

М.М. БЕЗЗУБЦЕВА, В.С. ВОЛКОВ, В.В. ЗУБКОВ

**ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОВЫХ
И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ
ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Рекомендовано УМО РАЕ по классическому
университетскому и техническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по направлению
подготовки:*

110800.68 – «Агроинженерия»

(Профиль: Электротехнологии

и электрооборудование в сельском хозяйстве)

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2013

УДК 621.311(07)
ББК 40.76

Составители: М.М. Беззубцева, В.С. Волков, В.В. Зубков

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, профессор РАЕ С.А. Ракутько;
кандидат технических наук, доцент, профессор РАЕ З.Ш. Юлдашев

М.М. Беззубцева, В.С. Волков, В.В. Зубков

А24: Прикладная теория тепловых и массообменных процессов в системном анализе энергоемкости продукции. – СПб.: СПбГАУ, 2013. – 131 с.

В учебном пособии рассмотрены фундаментальные законы, положенные в основу формирования, протекания, интенсификации и повышения энергоэффективности тепломассообменных процессов АПК. Особое внимание уделено основам системного анализа, методологии выявления основных факторов, определяющих энергоемкость продукции в потребительских энергосистемах. Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами дисциплины «Прикладная теория тепловых и массообменных процессов в системном анализе энергоемкости продукции» и предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению «Агроинженерия» (профиль «Электротехнологии и электрооборудование в с.х.»). Учебное пособие может быть использовано студентами, аспирантами, научными сотрудниками и инженерами, работающими в различных областях АПК.

УДК 621.311(07)
ББК 40.76

© М.М.Беззубцева,
В.С. Волков
В.В. Зубков

ПРЕДИСЛОВИЕ

Специфичность агропромышленной потребительской энергетики требует введения самостоятельного научно-прикладного понятия эффективности энергоиспользования на предприятиях отрасли, разработки специальных методов системного научного анализа и внедрения превентивных мер по снижению энергоемкости продукции. Материал, изложенный в учебном пособии, позволяет заложить будущим ученым основы знаний для более глубокого и систематизированного понимания специфики агропромышленной потребительской энергетики, продолжить самостоятельную работу по развитию указанных направлений.

Модуль «Прикладная теория тепловых и массообменных процессов в системном анализе энергоемкости продукции» является апробированным авторским курсом Беззубцевой М.М, органично интегрированным в общий образовательный процесс подготовки магистров по направлению 110800.68 - «Агроинженерия» и профилю «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве».

Целью учебного пособия «Прикладная теория тепловых и массообменных процессов в системном анализе энергоемкости продукции» является:

- формирование профессиональных компетенций магистров (агроинженеров) в области систематизированных знаний закономерностей тепломассообмена в установках и системах по

производству и распределению энергоносителей в потребительских энергосистемах (ПЭС) агропромышленного комплекса (АПК);

- развитие навыков и умения творческого использования прикладной теории тепломассообменных процессов при решении практических задач оптимизации энергоемкости выпускаемой продукции и повышения энергоэффективности производства.

АПК характеризуется весьма большим числом разнообразных производств, различными условиями протекания технологических процессов и многообразием производимой продукции. Вместе с тем технологические процессы представляют собой комбинацию сравнительно небольшого числа типовых процессов, лидирующую роль среди них занимают тепловые и массообменные процессы. Эти процессы реализованы в электротехническом оборудовании различных конструктивных модификаций. Закономерности их протекания описываются типовыми законами, что значительно упрощает расчет и анализ энергетических параметров (энергоемкости продукции, резерва энергосбережения и т.д.).

Учебное пособие состоит из введения и пяти глав: методология системного анализа потребительских энергосистем предприятий АПК; прикладная теория теплообменных процессов; прикладная теория массообменных процессов; законы равновесия, равновесное состояние, направление протекания и движущая сила процессов тепломассообмена; методика определения энергоемкости продукции в потребительских энергетических системах АПК.

Задачами первой главы является ознакомление магистрантов с методологией системного анализа тепломассообменных процессов, аппаратов и установок в потребительских энергосистемах сельскохозяйственных производств, а также формирование навыков применения энергосберегающих принципов и схем организации процессов, аппаратов и установок при оптимизации энергоемкости продукции, проектировании и энергетической

модернизации. Изложены принципы блочно–иерархического моделирования процессов ПЭС.

Следующие три главы объединяет общая методологическая основа структуры изложения материала. Представлен аналитический обзор фундаментальных и прикладных теоретических исследований тепломассообменных процессов, аппаратов и установок ПЭС. Рассмотрены закономерности тепломассообмена в установках и системах по производству и распределению энергоносителей.

В пятой главе представлена методика определения энергоемкости продукции в потребительских энергетических системах АПК и методика оценки энергоэффективности при интенсификации электротехнологических процессов сельскохозяйственного производства. Проанализирован энергоэкологический индекс воздействия ПЭС на окружающую среду.

Структура учебного пособия позволяет концентрировать внимание магистрантов на проблемных и перспективных вопросах потребительских энергосистем АПК.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами дисциплины «Прикладная теория тепловых и массообменных процессов в системном анализе энергоемкости продукции» и предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению «Агроинженерия» и профилю «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве».

Учебное пособие может быть использовано в очном, заочном и дистанционном обучении магистрантов. Представляет интерес для бакалавров, студентов, аспирантов, научных сотрудников, агроинженеров и специалистов, работающих в различных областях АПК.

Глава 1. МЕТОДОЛОГИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМ (ПЭС)

Научная, исследовательская и практическая деятельность проводится на базе методов (приемов или способов действия), методик (совокупности методов и приемов проведения исследований) и методологий (совокупности методов, правил распределения и назначения методов, а также шагов и их последовательности).

1.1 СИСТЕМНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ

В настоящее время используют такие понятия как «системный анализ», «системный подход», «теория систем», «принцип системности» и др.

Наиболее общим понятием, которое обозначает все возможные проявления систем, является «системность». Структуру системности целесообразно рассматривать в трех аспектах: системная теория, системный подход и системный метод.

Системная теория (теория систем) реализует объясняющую и систематизирующую функции: дает строгое научное знание о мире систем; объясняет происхождение, устройство, функционирование и развитие систем различной природы.

Системный подход следует рассматривать как некоторый методологический подход к действительности, представляющий собой некоторую общность принципов, системное мировоззрение.

Подход к системному изучению потребительских энергосистем (ПЭС)— это совокупность приемов и способов воздействия на объект. Принцип – это основное, исходное положение теории, наиболее общее правило деятельности, которое обеспечивает его правильность, но не гарантирует однозначности решения.

Подход — это некоторая обобщенная система представлений о том, как должна выполняться та или иная деятельность (но не детальный алгоритм действия), а принцип деятельности — множество некоторых обобщенных приемов и правил.

Системный подход — это методология научного познания и практической деятельности, а также объяснительный принцип, в основе которых лежит рассмотрение объекта как системы.

Системный подход заключается в отказе от односторонне аналитических, линейно–причинных методов исследования. Основной акцент при его применении делается на анализе целостных свойств объекта, выявлении его различных связей и структуры, особенностей функционирования и развития ПЭС. Системный подход представляется достаточно универсальным подходом при анализе, исследовании, проектировании и управлении ПЭС. Назначение системного подхода заключается в том, что он направляет деятельность агроинженера-энергетика на системное видение действительности. Он заставляет рассматривать ПЭС с системных позиций, точнее — с позиций ее системного устройства.

Таким образом, системный подход, будучи принципом познания, выполняет ориентационную и мировоззренческую функции.

Системный метод реализует познавательную и методологическую функции. Он выступает как некоторая интегральная совокупность относительно простых методов и приемов познания, а также преобразования действительности.

Конечная цель любой системной деятельности заключается в выработке решений, как на стадии проектирования ПЭС, так и при ее управлении. В этом контексте системный анализ можно считать сплавом методологии общей теории систем, системного подхода и системных методов обоснования и принятия решений.

1.2. ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНАЯ МЕТОДОЛОГИЯ И СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД

Центральное место в исследовании ПЭС занимают два противоположных подхода: анализ и синтез.

Анализ предусматривает процесс разделения целого на части. Он весьма полезен в том случае, если требуется выяснить, из каких частей (элементов, подсистем) состоит ПЭС. Посредством анализа приобретаются знания. Однако при этом нельзя понять свойства системы в целом.

Задача синтеза — построение целого из частей. Посредством синтеза достигается понимание.

В исследовании любой проблемы можно указать несколько главных этапов:

- постановка цели исследования;
- выделение проблемы (выделение системы): выделить главное, существенное, отбросив малозначимое, несущественное;
- описание: выразить на едином языке (уровне формализации) разнородные по своей природе явления и факторы;
- установление критериев: определить, что значит «хорошо» и «плохо» для оценивания полученной информации и сравнения альтернатив;
- идеализация (концептуальное моделирование): ввести рациональную идеализацию проблемы, упростить ее до допустимого предела;
- декомпозиция (анализ): разделить целое на части, не теряя свойств целого;
- композиция (синтез): объединить части в целое, не теряя свойств частей;
- решение: найти решение проблемы.

В отличие от традиционного подхода, при котором проблема решается в строгой последовательности вышеприведенных этапов (или в другом порядке), системный подход состоит в многосвязности процесса решения: этапы

рассматриваются совместно, во взаимосвязи и диалектическом единстве. При этом возможен переход к любому этапу, в том числе и возврат к постановке цели исследования.

Главным признаком системного подхода является наличие доминирующей роли сложного, а не простого, целого, а не составляющих элементов. Если при традиционном подходе к исследованию мысль движется от простого к сложному, от частей — к целому, от элементов — к системе, то в системном подходе, наоборот, мысль движется от сложного к простому, от целого к составным частям, от ПЭС к анализу ее элементов. При этом эффективность системного подхода тем выше, чем к более сложной ПЭС он применяется.

1.3. СИСТЕМНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

В настоящее время устоявшихся технологий системного анализа ПЭС в практике нет. Системный анализ ПЭС представляет собой слабосвязанную совокупность приемов и методов неформального и формального характера. Ситуация усугубляется тем, что, несмотря на полувековую историю развития системных идей, нет однозначности в понимании самого системного анализа.

В настоящее время существуют следующие варианты системного анализа в энергетической сфере АПК:

1. Отождествление технологии системного анализа с технологией научного исследования. При этом для самого системного анализа в этой технологии практически не находится места.
2. Сведение системного анализа к системному конструированию. По сути, системно-аналитическая деятельность отождествляется с системотехнической деятельностью.
3. Очень узкое понимание системного анализа, сведение его к одной из его составляющих, например к структурно-функциональному анализу.

4. Отождествление системного анализа с системным подходом в аналитической деятельности.
5. Понимание системного анализа как исследования системных закономерностей.

В узком смысле под системным анализом довольно часто понимают совокупность математических методов исследования систем. Сведение системного анализа к совокупности методологических средств, которые используются для подготовки, обоснования и осуществления решений по сложным проблемам.

Таким образом, то, что называют в настоящее время системным анализом в энергетической сфере АПК, представляет собой недостаточно интегрированный массив методов и приемов системной деятельности.

1.4. ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ И ПРОЕКТИРОВАНИЮ СИСТЕМ

При анализе и проектировании действующих ПЭС могут интересовать разные аспекты: от внутреннего устройства системы до организации управления в ней. В связи с этим условно выделяют следующие подходы к анализу и проектированию:

- системно-элементный;
- системно-структурный;
- системно-функциональный;
- системно-коммуникативный;
- системно-управленческий;
- системно-информационный.

Системно-элементный подход. Непременной принадлежностью систем являются их компоненты, части, именно то, из чего образовано целое и без чего оно невозможно.

Системно-элементный подход отвечает на вопрос, из чего (каких элементов) образована система. Этот подход иногда называли "перечислением" системы. Его вначале пытались применить для исследования сложных систем. Однако первые же попытки применить такой подход к исследованию систем управления энергопредприятиями и организациями показали, что «перечислить» сложную энергетическую систему практически невозможно.

Системно-структурный подход. Компоненты системы представляют не набор случайных бессвязных объектов. Они интегрированы системой и являются компонентами именно данной системы.

Системно-структурный подход направлен на выявление компонентного состава системы и связей между ними, обеспечивающих целенаправленное функционирование.

При структурном исследовании предметом исследований, как правило, являются состав, структура, конфигурация, топология и т. п.

Системно-функциональный подход. Цель выступает в системе как один из важных системообразующих факторов. Но цель требует действий, направленных на ее достижение, которые есть не что иное, как ее функции. Функции по отношению к цели выступают как способы ее достижения. Системно-функциональный подход направлен на рассмотрение системы с точки зрения ее поведения в среде для достижения цели функционирования ПЭС – снижение энергоемкости продукции.

При функциональном исследовании рассматриваются: динамические характеристики, устойчивость, живучесть, энергоэффективность, т. е. все то, что при неизменной структуре системы зависит от свойств ее элементов и их отношений.

Системно-коммуникативный подход. Каждая система всегда является элементом (подсистемой) другой, более высокого уровня. Сама система, в свою очередь, образована из подсистем более низкого уровня. Иначе говоря, система связана множеством отношений (коммуникаций) с самыми различными

системными и несистемными образованиями. Системно-коммуникативный подход направлен на изучение системы с точки зрения ее отношений с другими, внешними по отношению к ней, системами.

Системно-управленческий подход. Система постоянно испытывает на себе возмущающие воздействия. Это - прежде всего внутренние возмущения, являющиеся результатом внутренней противоречивости любой системы. Это и внешние возмущения, которые далеко не всегда благоприятны: недостаток ресурсов, жесткие ограничения и т. д. Между тем система живет, функционирует, развивается. Значит, наряду со специфическим набором компонентов, внутренней организацией (структурой) и т. д., есть и другие системообразующие, системосохраняющие факторы. Эти факторы обеспечения устойчивости жизнедеятельности системы называют управлением. Системно-управленческий подход направлен на изучение системы с точки зрения обеспечения ее целенаправленного функционирования в условиях внутренних и внешних возмущений.

Системно-информационный подход. Управление в системе невозможно без передачи, получения, хранения и обработки информации. Информация — это способ связи компонентов системы друг с другом, каждого из компонентов с системой в целом, а системы в целом — со средой. В силу сказанного, нельзя раскрыть сущность системности без изучения ее информационного аспекта.

Системно-информационный подход направлен на изучение системы с точки зрения передачи, получения, хранения и обработки данных внутри системы и в связи со средой.

1.5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Конечная цель системного анализа — оказать помощь в понимании и решении имеющейся проблемы, что сводится к поиску и выбору варианта решения проблемы. Результатом будет выбранная альтернатива либо в виде

управленческого решения, либо в виде создания новой ПЭС или реорганизации старой. Неполнота информации о проблемной ситуации затрудняет выбор методов ее формализованного представления и не позволяет сформировать математическую модель. В этом случае возникает необходимость в разработке методик проведения системного анализа.

Необходимо определить последовательность этапов системного анализа, рекомендовать методы для выполнения этих этапов, предусмотреть при необходимости возврат к предыдущим этапам. Такая последовательность определенным образом выделенных и упорядоченных этапов и подэтапов в сочетании с рекомендованными методами и приемами их выполнения представляет собой структуру методики системного анализа.

Практики видят в методиках важный инструмент для решения проблем своей предметной области. И хотя к сегодняшнему дню накоплен большой их арсенал, но, к сожалению, следует признать, что разработка универсальных методов и методик не представляется возможной. В каждой предметной области, для различных типов решаемых проблем системному аналитику приходится разрабатывать свою методику системного анализа на базе множества принципов, идей, гипотез, методов и методик, накопленных в области теории систем и системного анализа.

При разработке методики системного анализа прежде всего следует определить тип решаемой задачи (проблемы). Затем, если проблема охватывает несколько областей: выбор целей, совершенствование оргструктуры, организацию процесса принятия и реализации решения, выделить в ней эти задачи и разработать методики для каждой из них.

Предлагается следующий перечень процедур системного анализа:

1. Определить границы исследуемой системы (выделить системы из окружающей среды).
2. Определить все подсистемы, в которые входит исследуемая система в качестве части.

3. Определить основные черты и направления развития всех надсистем, которым принадлежит данная система в частности, сформулировать их цели и противоречия между ними.
4. Определить роль исследуемой системы в каждой надсистеме, рассматривая эту роль как средство достижения целей надсистемы.

Следует рассмотреть при этом два аспекта:

- идеализированную, ожидаемую роль системы с точки зрения надсистемы, т. е. те функции, которые следовало бы выполнять, чтобы реализовать цели надсистемы;
 - реальную роль системы в достижении целей надсистемы.
5. Выявить состав системы, т. е. определить части, из которых она состоит.
 6. Определить структуру системы, представляющую собой совокупность связей между ее компонентами.
 7. Определить функции активных элементов системы, их «вклад» в реализацию роли системы в целом. Принципиально важным является гармоническое, непротиворечивое сочетание функций разных элементов системы. Эта проблема особенно актуальна для подразделений предприятий АПК, чьи функции часто во многом «не состыкованы», недостаточно подчинены общему замыслу.
 8. Выявить причины, объединяющие отдельные части в систему, в целостность. Они носят название интегрирующих факторов, к которым в первую очередь относится человеческая деятельность. В ходе деятельности человек осознает свои интересы, определяет цели, осуществляет практические действия, формируя системы средств для достижения целей. Исходным, первичным интегрирующим фактором является цель. Цель в любой сфере деятельности представляет собой сложное сочетание различных противоречивых интересов. Всестороннее познание цели позволяет судить о степени устойчивости системы, о ее

непротиворечивости, целостности, предвидеть характер ее дальнейшего развития.

9. Выявить связь с внешней средой. Для действительно глубокого, всестороннего изучения системы недостаточно выявить ее связи со всеми подсистемами, которым она принадлежит. Необходимо еще познать такие системы во внешней среде, которым принадлежат компоненты исследуемой системы. Нужно видеть связь между используемыми на предприятии технологиями и «пространством» научно-технического процесса и т. д. Осознание органического, хотя и противоречивого единства всех систем, окружающих предприятие, позволяет понимать причины его целостности, предотвращать процессы, ведущие к дезинтеграции.

10. Рассмотреть исследуемую систему в динамике, в развитии. Для глубокого понимания любой системы нельзя ограничиваться рассмотрением коротких промежутков времени ее существования и развития. Целесообразно по возможности исследовать всю ее историю, выявить причины, побудившие создать эту систему, определить иные системы, из которых она выростала и строилась. Также важно изучать не только историю системы или динамику ее нынешнего состояния, но и попытаться, используя специальные приемы, увидеть развитие системы в будущем, т. е. прогнозировать ее будущие состояния, проблемы, возможности.

Изложенная последовательность процедур системного анализа не является обязательной и закономерной. Обязательным является перечень процедур, чем их последовательность. Единственное правило заключается в целесообразности многократного возвращения в ходе исследования к каждой из описанных процедур. Только это является залогом глубокого и всестороннего изучения и оптимизации ПЭС АПК.

1.6. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Методы энергосбережения в стационарном производстве АПК уже продолжительное время разрабатываются на кафедре «ЭОП и ЭТ в АПК». Многие из них прошли апробацию и опытную проверку. Это позволяет рассматривать их совокупность как методическую базу для адаптации под задачи энергосбережения в мобильной энергетике. Основные понятия, положенные в основу методики, следующие:

1. *Потребительская энергетическая система (ПЭС) и ее схема.* Отличительным признаком ПЭС является наличие в ней энерготехнологических процессов (ЭТП) трех видов, определяемых результатом использования энергии: ЭТП–1 – результат - продукция производства, вспомогательных ЭТП–2 и обеспечивающих условия жизнедеятельности ЭТП–3. Схема ПЭС не только отражает переход к процессовому анализу, но и выстраивает логику исследования: расчетное (на основе научных представлений процесса), определение минимального расхода энергии на результат каждого ЭТП, измерение фактического расхода энергии и определение наиболее энергоемких ЭТП и элементов. Мобильные процессы с использованием топлива отнесены к вспомогательным (ЭТП–2). Поскольку в общее число результатов анализируемых процессов входит и выпускаемая предприятием продукция, то ПЭС следует считать основным и начальным объектом в иерархии производственных объединений при системных анализах эффективности энергоиспользования по критерию энергоемкости продукции, в том числе и при анализе использования топлива.

2. *Универсальный критерий энергоэффективности.* Основной критерий эффективности – энергоемкость продукции как отношение всей потребленной энергии (включая топливо) к объему произведенной продукции. Кроме

основного критерия энергоэффективности введен новый критерий – относительная энергоемкость, определяемый как отношение подведенной к элементу энергии к энергии, отводимой от него (для передающих и преобразующих энергию элементов), линейно связанный с основным. С помощью этих критериев можно получить энергоемкость дохода предприятия или энергоемкость валового продукта отрасли. Таким образом, энергосбережение как вид профессиональной деятельности агроинженера по управлению потребительской энергетикой обеспечено общепринятыми критериями оптимизации и оценки. При включении в ПЭС мобильных силовых процессов и биологических объектов (животное, птица и растение) критерии энергоэффективности сохраняются ввиду своей относительности.

3. *Теоретические положения энергосбережения в ПЭС.* Методы математического анализа не могут рассматриваться в качестве теории энергосбережения. В условиях потребительской системы основной критерий эффективности (энергоемкость продукции) прямо не связан дифференциальным уравнением с потребленной энергией. Кроме этого, при решении задач эффективности нельзя признать мощность полной производной энергии, так как интегрирование по времени является исключительно математической операцией, не учитывающей какие-либо условия (состояние), в частности, уменьшение мощности движущейся энергии за счет собственных потерь. Поэтому разработанный метод конечных отношений (МКО) основан на том, что любой технический элемент ПЭС является объемным, в конечных сечениях объема проходящая энергия не только является интегралом мощности, но и измеряется счетчиком. Разность конечных мощностей является выражением закона сохранения и легко переводится в показатели эффективности. Доказано, что энергетические линии ПЭС, составленные из последовательно соединенных элементов, имеют относительную энергоемкость, равную произведению энергоемкостей элементов. Это позволило в МКО обойти изломы функций мощности в каждом соединении.

Для использования МКО как метода вычисления показателей эффективности процессов в элементах необходимо иметь данные о функциях энергии и мощности в конечных сечениях элементов, которые определяются измерениями. Мобильные силовые процессы потребуют другие измерительные схемы для получения показателей энергетических процессов.

4. *Энергетические характеристики оборудования.* Основной причиной повышения энергоемкости продукции является рост относительных потерь в оборудовании при отклонении режима потребления от номинального. Для некоторых видов оборудования в технической документации приводятся показатели, характеризующие снижение эффективности оборудования (например, снижение КПД асинхронного двигателя). Такие данные получили название энергетической характеристики оборудования. Она нужна для контроля состояния, ухудшающегося в процессе эксплуатации оборудования.

5. *Содержание мероприятий по организации практического энергосбережения на предприятиях.* Масштабные работы по энергосбережению (АПК района, региона) осуществляется фирмой, специализирующейся на договорных аутсорсинговых услугах потребителям энергии. Информация об эффективности всех энергетических процессов в ПЭС поступает от информационно – измерительной системы (ИИС). Для контроля мобильных процессов используются системы дистанционного контроля и дистанционной передачи данных. Обработка данных, полученных при энергоаудитах ПЭС, производится в диспетчерском пункте, оснащенном устройствами приема информации, вычислительной техникой, базами.

При рассмотрении производства АПК как сложной системы предварительно необходимо изучить связи между элементами, выявить совокупность управляемых и неуправляемых параметров, способных влиять на показатели энергоемкости процесса и качество продукции. К ним обычно относят:

- составы потоков, их расходы и технологические параметры (температура, давление, концентрация и т.д.);
- количество подводимой и отводимой энергии.

То есть те параметры, от которых прежде всего зависит протекание технологического процесса, энергетические и капитальные затраты на производство продуктов.

При разработке и исследовании сложных систем, характеризующих любой технологический объект, выделяют, как правило, два класса основных задач:

- задачи синтеза, сводящиеся к выбору структуры и значений параметров на основе заданных свойств системы;
- задачи анализа, связанные с изучением свойств поведения системы в зависимости от её структуры и значений параметров.

Синтез ТС – это операция выбора типов элементов и структуры технологических связей между ними, определения параметров элементов и технологических потоков системы, которые, в конечном счёте, обеспечивают оптимальное значение критерия энергетической эффективности.

Системой называется множество находящихся в отношениях и связях между собой элементов, представляющих единое целое и предназначенное для достижения какой-либо цели.

Система технологических процессов в производствах АПК – это совокупность элементов, обладающая двумя основными особенностями:

- технологический объект базируется на анализе комплекса явлений, характеризующих все процессы (энергетические, массообменные, механические и т. д.), поскольку производство нельзя рассматривать как сумму отдельных технологических операций и процессов. Каждый отдельный элемент производства непосредственно или косвенно влияет на другие элементы. Между элементами системы существует способ взаимодействия, выраженный в её структуре (структурной схеме);

- система функционирует при взаимодействии с окружающей средой.

Элемент системы – это самостоятельная и условно неделимая составляющая системы. Любой элемент системы рассматривается как система более низкого порядка, а сама система – как элемент системы более высокого уровня.

Структурная схема исследуемого объекта (СС) включает условно обозначенное на схеме электротехнологическое оборудование (элементы системы), имеет входы и выходы информационных потоков (материальных, энергетических и др.) с указанием направления переноса. СС дает информацию о характерах потоков и их преобразованиях в элементах системы.

Анализ и синтез систем основаны на понятиях иерархичности, т.е. отдельные уровни системы определяют аспекты ее функционирования. Результат взаимодействия всех уровней системы определяет ее работу.

Таким образом, системный анализ производств АПК, как технологической системы, осуществляют по следующим этапам:

- согласование и распределение материальных и энергетических потоков, определение общей энергетической нагрузки на аппараты;
- выбор и расчёт технологического оборудования с определением коэффициента энергоэффективности;
- определение энергозатрат, затрат на всё производство и анализ различных вариантов технологических схем по критерию оптимизации – энергоэффективности;
- окончательный выбор технологической схемы производства.

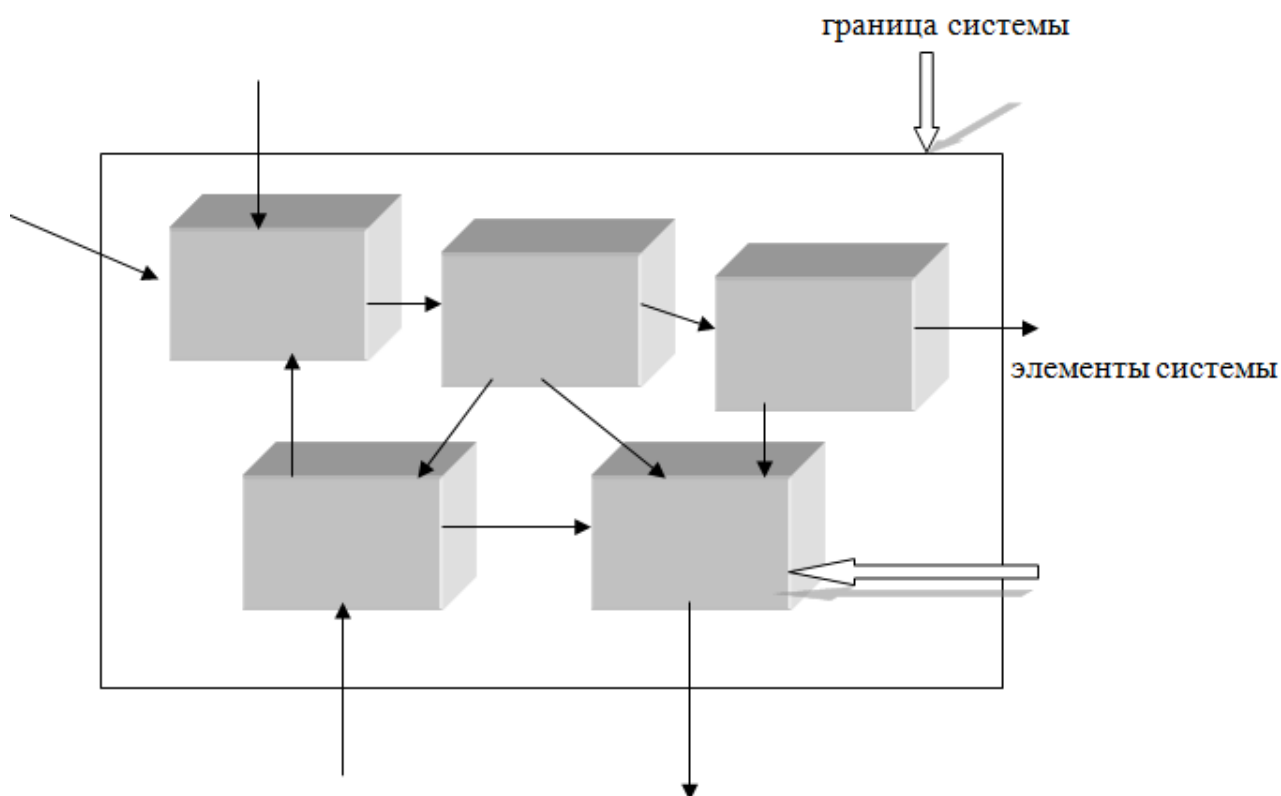


Рис.1.1. Структурная схема

Научная стратегия системного анализа и синтеза технологических процессов в потребительских энергосистемах АПК, методология проектирования и теория разработки оптимальных ПЭС систем разработана научной школой проф. В.Н.Карпова. Вопросы оптимизации ПЭС применительно к технологическим системам переработки сельскохозяйственной продукции и оптическим технологиям тепличного производства отражены в работах научной школы проф. Беззубцевой М.М., научных исследованиях проф. Ракутько С.А. и доц. Котова А.В..

Согласно научной школе Беззубцевой М.М. в процессах переработки сырья АПК задачи энергосбережения высокоэффективных схем и оборудования целесообразно рассматривать со следующих позиций:

- во-первых, с точки зрения оптимизации процессов по организации движения и взаимодействия материальных и энергетических потоков в

существующих аппаратах, агрегатах, установках, линиях и схемах производства, а также их совершенствования;

- во-вторых, в более широком смысле – это разработка новых высокоэффективных и ресурсосберегающих технологий, схем, линий, агрегатов, установок и энергоэкономичного оборудования с использованием электрофизических, электрохимических и электробиологических технологий. Для решения этих задач проблема анализируется на различных уровнях иерархии и с учетом требований, обусловленных процессно-аппаратурными и технологическими особенностями производства. Развитие подхода к решению поставленных задач применительно к процессам переработки сельскохозяйственного сырья целесообразно основывать на следующих иерархических уровнях: мегамишштаба, макромишштаба, мезомишштаба и микромишштаба. При этом следует иметь в виду, что графическое изображение структурно-функциональной схемы технологических линий переработки, предопределяет этапы исследования всей системы в целом. Поэтому данные исследования, связанные с совершенствованием и разработкой высокоэффективных и энергосберегающих схем и оборудования, во-первых, должны проводиться в рамках той или иной подсистемы и быть направлены на достижение поставленной цели – снижение энергоемкости продукции при повышении ее качественных показателей. Во-вторых, анализ основан на принципе нисходящей иерархии и восходящей иерархии синтеза в решении поставленных задач.
- в-третьих, проблема решается путем пропорционально-последовательного продвижения по всему комплексу взаимосвязанных этапов, прямых и обратных связей между ними и с их энерготехнологической оценкой, а также определения возможных направлений исследований. При этом постадийный анализ с учетом

особенностей и специфики этапов переработки сельскохозяйственного сырья обеспечивает применение принципа пространственно-временных масштабов, который необходим для исследования и разработки совмещенных высокоэффективных технологических процессов и создания многофункциональных машин и аппаратов.

Уровень мегамасштаба блочной структуры системы производства АПК – это взаимодействие производства с внешней средой. Исследования с позиций системного анализа, совмещенного с энтальпийно–энергетическим методом, позволяют определить соответствующий комплекс задач по энерго- и ресурсосбережению, которые последовательно распространяются до уровня микромасштаба. Основные направления исследований, выявленных на уровне мегамасштаба, должны быть направлены на разработку высокоэффективных технических решений, которые обеспечивают максимальное снижение теплового загрязнения атмосферы и создание малосточных или бессточных схем. На уровне макромасштаба исследуется структура модулей и характерные энерготехнологические связи между ними. Устанавливаются основные направления энергосбережения, которые определены установкой, агрегатом, линией, цехом или заводом производства. Основные задачи направлены на решение вопросов по интеграции и оптимизации материальных и энергетических потоков, процессов и систем, разработки энерготехнологических решений, по исключению в системе рециклических и обратных связей, т.е. повышению структурной целостности системы, за счет уменьшения числа ее элементов и упрощение связей между ними, что обеспечивает увеличение степени однородности структуры производства.

На уровне мезомасштаба проводился анализ технологических операторов и их связей в модулях подготовки сырья, его переработки, упаковки, транспортировки и (при необходимости) хранения.

Задачи снижения энергоемкости продукции на этом уровне решаются путем создания новых процессно-аппаратных систем, границы которых

совпадают с границами машин и аппаратов, выполняющие базовые технологические операции, а также путем совершенствования действующего оборудования и оптимизации технологических режимов.

Задачи энерго– и ресурсосбережения на уровне микромасштаба направлены, во-первых, на интенсификацию процессов и уменьшение диссипации энергии взаимодействия на межфазной поверхности частиц, пузырей, капель и их потоков с рабочей поверхностью функционально-конструктивных элементов и узлов машин и аппаратов, выполняющих базовые технологические операции. Во-вторых, на разработку критериев энергетической эффективности функционирования оборудования, имеющие неразрывную связь с определяющими конструкторско-технологическими параметрами. Интенсификация обеспечивается применением электрофизических и физико-химических методов, активации технологических операций, центробежных полей, ультразвуковых и низкочастотных колебаний. Уменьшение диссипации энергии достигается созданием условий и применением материалов с такими физико-механическими свойствами, которые обеспечивают снижение коэффициентов трения и удара, парусности (в процессах очистки семян и отделения плодовой оболочки) и т.д.

В результате научно обосновываются основные направления исследований, разработки и создания энергосберегающих и высокоэффективных технологий и оборудования. Разрабатывается комплекс ресурсосберегающих технических решений и энергоэкономичного оборудования производства.

Согласно научной школе В.Н. Карпова сельскохозяйственные производства можно представить в виде искусственной биоэнергетической системы (ИБЭС). Важнейшими объектами ИБЭС и соответствующими им ЭТП являются: сельскохозяйственный биологический объект (СБО), являющийся объектом приложения основного технологического процесса производства продукции для реализации (ЭТП_0); технические средства

создания микроклимата (ТСМ), обеспечивающие условия жизнедеятельности (ЭТП_М); биологические и технические средства (БТС) подготовки обработки СБО, обеспечивающие процесс предварительной подготовки условий для осуществления основного производственного процесса (ЭТП_П).

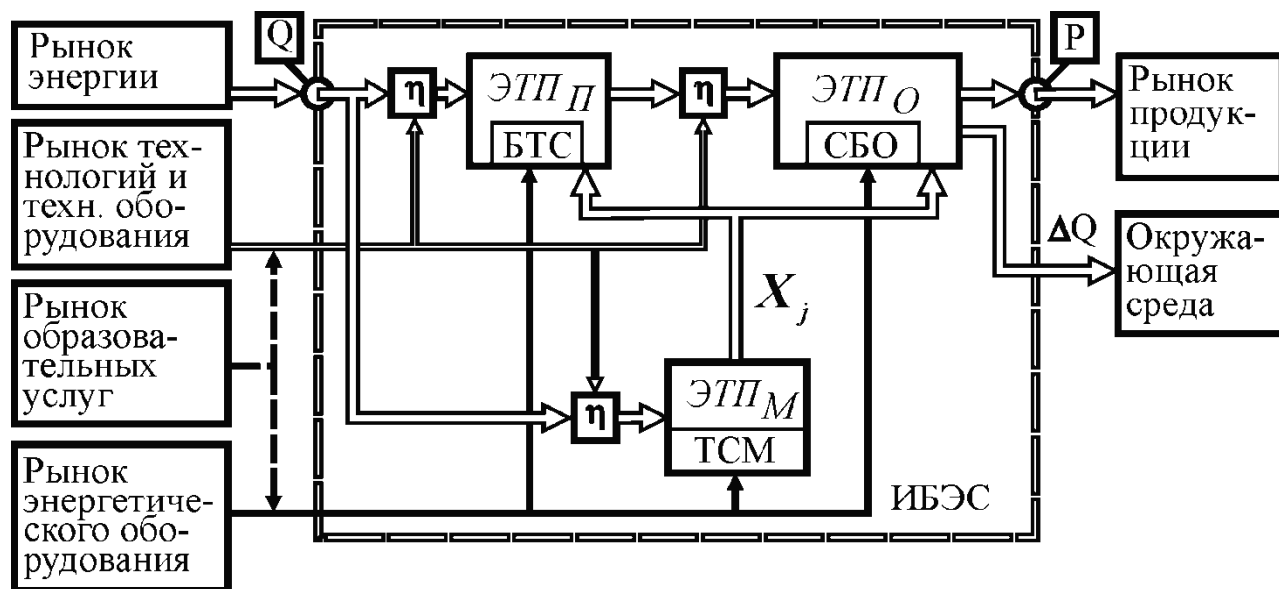


Рис. 1.2. Структурная схема производств АПК:

ЭТП - энерготехнологический процесс (технологический процесс), в ходе которого производится энергетическое воздействие на объекты; СБО - сельскохозяйственный биологический объект являющийся объектом приложения основного технологического процесса производства продукции для реализации ЭТП_О; ТСМ - технические средства создания микроклимата, обеспечивающие условия жизнедеятельности ЭТП_М.

Выполнение первого этапа системного анализа возможно только после изучения процессов в материальном объекте (продукции), образующейся на различных этапах, а также выявления всех ограничений при его производстве.

Каждую технологию производства продукции, представляющую систему, необходимо рассматривать как единство противоположных сторон: целостности и расчленённости.

Расчленённость отражает одну из общих сторон структуры системы и характеризуется тремя признаками:

- качественная специфика частей системы;
- число частей, на которые расчленяется рассматриваемая система;

– взаимное расположение в пространстве и во времени.

Наличие отношений и связей между элементами, образующими систему, позволяет ей выступать в качестве единого целого во взаимоотношениях с внешней средой.

Параметрическая схема исследуемых объектов (ПСИО) дает представление о всех внешних параметрах, воздействующих на систему и определяющих характер и реакцию системы на эти воздействия. ПСИО применяют при составлении энергетических и материальных балансов.

Определение материальных и энергетических потоков, обладающих определёнными свойствами и параметрами, а также параметров работы отдельного ЭТО позволяет оценить как характеристику, так и структуру любой подсистемы технологического объекта. При этом имеется в виду, что рассматриваемый объект предназначен для выполнения определённой функции, т.е. осуществления каких-либо технологических операций, результатом которых является выход продукта или полупродукта.

Исходя из внешних признаков, для системы можно выделить следующие внешние связи (рис. 1.3):

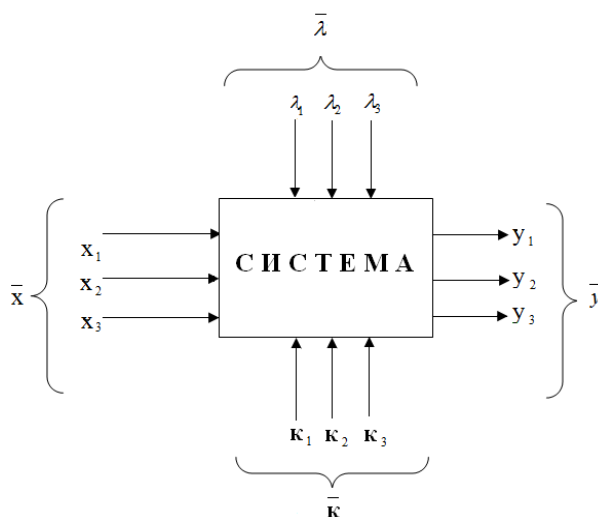


Рис. 1.3. Параметрическая схема:

x_1, x_2, x_3 - входные параметры; x, λ, k - внешние силы; y - реакция системы; k_1, k_2, k_3 - воздействующие параметры; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - возмущающие параметры. $y = \varphi(x, \lambda, k)$.

Все переменные, определяющие состояние технологического объекта, независимо от его физической сущности, можно разделить на четыре группы:

Группа X. В эту группу входят факторы, которые характеризуют сырье, промежуточные продукты и не допускают целенаправленного изменения в ходе исследования. К входным и промежуточным продуктам можно отнести исходные вещества или продукты предыдущих звеньев технологической цепи. Информация о значениях переменных этой группы получается в результате лабораторных анализов, измерений и т. п. Часто эту группу факторов определяют как контролируемые, неуправляемые факторы процесса.

Группа K. Эту группу образуют управляемые факторы процесса. С их помощью реализуется заданный технологический режим. К ним относятся показания расходомеров, установок регуляторов и т. п. На значения управляемых факторов накладываются технологические ограничения.

Группу Y называют выходными контролируемыми параметрами. К их числу относятся величины, характеризующие экономическую эффективность процесса, технико-экономические параметры, технологические свойства и характеристики готовых продуктов. Переменные этой группы часто используются в качестве целевых величин при оптимизации процессов.

Группу λ образуют неконтролируемые, возмущающие факторы, которые не могут быть измерены (неконтролируемые примеси в сырье, старение катализаторов и т. д.). Именно наличие этих факторов в основном обуславливает вероятностный характер большинства конкретных технологических процессов и приводит к необходимости использования статистических методов оценки их состояния.

Глава 2. ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс переноса теплоты, происходящий между телами, имеющими различную температуру, называется теплообменом. Его движущей силой является разность температур между более и менее нагретыми телами. Тела, участвующие в теплообмене, называются теплоносителями. Различают три способа распространения теплоты: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность представляет собой перенос теплоты от более к менее нагретым участкам тела вследствие теплового движения и взаимодействия микрочастиц, непосредственно соприкасающихся друг с другом. В твердых телах теплопроводность обычно является основным видом распространения тепла.

Конвекцией называют перенос теплоты вследствие движения и перемешивания макроскопических объемов газа или жидкости. Перенос тепла возможен в условиях свободной конвекции, обусловленной разностью плотностей в различных точках объема жидкости, возникающей вследствие неодинаковых температур в них или в условиях вынужденной конвекции, когда происходит принудительное движение всего объема жидкости, например, при перемешивании ее мешалкой.

Тепловое излучение - процесс распространения электромагнитных колебаний с различной длиной волн, обусловленный тепловым движением атомов и молекул излучающего тела. Все тела способны излучать энергию, которая поглощается другими телами и снова превращается в тепло.

Интенсивность теплового излучения возрастает с повышением температуры тела и приобретает доминирующее значение только при $t > 600^\circ\text{C}$. Более

подробно этот способ распространения теплоты рассмотрен в курсе «Электротехнология».

В реальных условиях тепло передается не одним способом, а двумя или тремя.

Теплоотдача - это перенос теплоты от стенки к газообразной (жидкой) среде или в обратном направлении. Теплопередача - это процесс передачи теплоты от более нагретой к менее нагретой жидкости (газу) через разделяющую их поверхность или твердую стенку.

В непрерывнодействующих аппаратах температуры в различных точках не изменяются во времени и протекающие процессы теплообмена являются установившимися (стационарными). В периодически действующих аппаратах, где температуры меняются во времени, осуществляются нестационарные процессы теплообмена.

Тепловое воздействие на материалы является необходимым условием технологических процессов большинства перерабатывающих производств АПК. Теплота распространяется в средах, различающихся специфическими свойствами. В процессе технологической обработки материалы претерпевают во времени качественные превращения, что вызывает соответствующее изменение условий теплопередачи. Поэтому многие процессы теплообмена в перерабатываемых средах происходят в переменных, нестационарных условиях.

Задачи тепловой обработки материалов и технологических сред разнообразны. В зависимости от целей технологии происходят следующие тепловые процессы:

- а) нагревание и охлаждение однофазных и многофазных сред;
- б) конденсация паров химически однородных жидкостей и их смесей;
- в) испарение воды в парогазовую среду (увлажнение воздуха, сушка материалов);
- г) кипение жидкостей.

В большинстве случаев непосредственный контакт продуктов с другими теплоносителями недопустим, поэтому теплопередачу осуществляют в различных теплообменниках, где твердая стенка разделяет рабочие среды. Твердая стенка служит поверхностью нагрева и конструктивно выполняется в виде труб, рубашек и т.д.

Расчет теплообменной аппаратуры состоит из 2-х основных этапов:

1. Определение теплового потока (тепловой нагрузки аппарата), т.е. количества теплоты Q , которое должно быть передано за определенное время от одного теплоносителя к другому. Тепловой поток вычисляется путем составления и решения тепловых балансов.
2. Определение поверхности теплообмена F , обеспечивающей передачу требуемого количества теплоты Q в заданное время τ . Поверхность теплообмена находят из основного уравнения теплопередачи, вычислив предварительно значение средней разности температур между теплоносителями $\Delta t_{\text{ср}}$ и коэффициент теплопередачи K :

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}} \cdot \tau. \quad (2.1.)$$

2.2. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Теплота Q_1 , отдаваемое более нагретым теплоносителем, затрачивается на нагрев более холодного Q_2 и на компенсацию потерь $Q_{\text{п}}$ в окружающую среду.

Величина тепловых потерь в аппаратах, покрытых тепловой изоляцией, принимается в диапазоне 3...5%. В первом приближении ею можно пренебречь. Тогда тепловой баланс выразится равенством

$$Q = Q_1 = Q_2, \quad (2.2)$$

где Q - тепловая нагрузка аппарата.

Если расходы "горячего" и "холодного" теплоносителей составляют Q_1 и Q_2 соответственно, а их энтальпии на входе в аппарат I_{1H} , I_{2H} и на выходе I_{1K} , I_{2K} , уравнение теплового баланса будет иметь следующий вид

$$Q = G_1(I_{1H} - I_{1K}) = G_2(I_{2K} - I_{2H}). \quad (2.3)$$

Для случая теплообмена без изменения агрегатного состояния теплоносителей, энтальпия последних заменяется произведением теплоемкости C на температуру t :

$$I_{1H} = C_{1H} \cdot t_{1H}, I_{2K} = C_{2K} \cdot t_{2K}, I_{2H} = C_{2H} \cdot t_{2H}, I_{1K} = C_{1K} \cdot t_{1K}. \quad (2.4)$$

Величины C_{1H} и C_{1K} - это средние удельные теплоемкости "горячего" теплоносителя в диапазоне изменения температур от 0 до t_{1H} (на входе) и t_{1K} (на выходе) соответственно. Для "холодного" теплоносителя C_{2H} и C_{2K} - средние удельные теплоемкости в пределах 0 - t_{2H} и 0 - t_{2K} . В технических расчетах значения энтальпий обычно находят при заданной температуре из тепловых и энтропийных диаграмм или справочных таблиц.

При изменении агрегатного состояния теплоносителя (конденсация пара, испарение жидкости и т.д.) или протекании химических реакций, сопровождающихся тепловыми эффектами, их необходимо учитывать. Например, при конденсации насыщенного пара, являющегося "горячим" теплоносителем, величина I_{1K} в уравнении (2.3) представляет собой энтальпию удаляемого парового конденсата.

2.3. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Основным уравнением теплопередачи является общая кинетическая зависимость между тепловым потоком Q и поверхностью теплообмена F :

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau, \quad (2.5)$$

где K - коэффициент теплопередачи, определяющий среднюю скорость

передачи теплоты вдоль всей поверхности теплообмена; $\Delta t_{\text{ср}}$ - средняя разность температур между теплоносителями, определяющая среднюю движущую силу процесса теплопередачи или температурный напор; τ - время.

Для непрерывных процессов теплообмена уравнение имеет вид:

$$Q = Q' / \tau = K \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}, \quad (2.6)$$

где Q - тепловой поток (количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную поверхность).

Из представленных уравнений можно определить размерность и физический смысл коэффициента теплопередачи K

$$[K] = \left[\frac{Q}{F \cdot \Delta t \cdot \tau} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}} \right]. \quad (2.7)$$

Коэффициент теплопередачи показывает, какое количество теплоты (в Дж) переходит за 1 сек от "горячего" к "холодному" теплоносителю через поверхность теплообмена 1 м^2 при средней разности температур между ними, равной 1 град.

2.4. ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬЮ И КОНВЕКЦИЕЙ

Процесс передачи теплоты теплопроводностью описывается законом Фурье, согласно которому количество теплоты dQ , передаваемое посредством теплопроводности через элемент поверхности dF , перпендикулярный тепловому потоку, за время $d\tau$ прямо пропорционально температурному градиенту dt / dn , поверхности dF и времени $d\tau$:

$$dQ = \lambda \frac{dt}{dn} \cdot dF \cdot d\tau. \quad (2.8)$$

Температурным градиентом называется производная температуры по нормали к изотермической поверхности.

Коэффициент теплопроводности имеет размерность:

$$[\lambda] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}} \right]$$

и показывает, какое количество теплоты переносится путем теплопроводности в единицу времени через единицу поверхности теплообмена при падении температуры на 1 град на единицу длины нормали к изометрической поверхности.

Для характеристики теплоинерционных свойств вещества введем понятие коэффициента температуропроводности "а". Чем больше величина "а" у вещества, тем быстрее оно нагревается или охлаждается:

$$[a] = \left[\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \right] = \left[\frac{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right].$$

Интенсивность переноса теплоты конвекцией зависит от степени турбулентности потока жидкости и перемешивания частиц внутри его. Конвекция зависит от гидродинамических условий течения потока жидкости.

В ядре потока перенос тепла осуществляется одновременно теплопроводностью и конвекцией. Совместный перенос тепла этими способами называется конвективной теплоотдачей. Механизм переноса тепла в ядре потока при его турбулентном движении характеризуется интенсивным перемешиванием макрообъемов среды, которое приводит к выравниванию температур до некоторого среднего значения $t_{\text{ж}}$. По мере приближения к стенке интенсивность теплоотдачи падает.

Это объясняется тем, что вблизи нее образуется тепловой пограничный слой, подобный гидродинамическому пограничному слою, но обычно меньше его по толщине. В этом слое, по мере приближения к стенке, все большее значение приобретает теплопроводность, а влияние турбулентности становится пренебрежимо мало (рис.2.1).

Плотность турбулентного теплообмена q_T в направлении оси "y" определяется выражением:

$$q_T = -\lambda_T \cdot \frac{dt}{dy}, \quad (2.9)$$

где λ_T - коэффициент турбулентной теплопроводности.

Величина коэффициента турбулентной теплопроводности в области теплового слоя уменьшается по мере приближения в стенке.

Для интенсификации конвективного теплообмена необходимо уменьшить толщину теплового пограничного слоя.

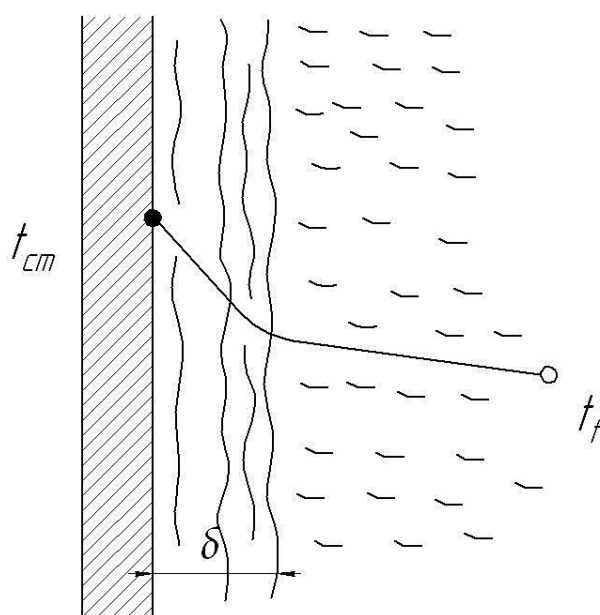


Рис. 2.1. Схема конвективного теплообмена

Интенсивность переноса тепла в ядре потока за счет λ_T определяется коэффициентом турбулентной температуропроводности:

$$a_T = \frac{\lambda_T}{c \cdot \rho}, \quad (2.10)$$

величина которого в области теплового слоя, по мере приближения в стенке уменьшается. Для интенсификации конвективного теплообмена необходимо уменьшить толщину теплового пограничного слоя.

Сложность механизма конвективного теплообмена обуславливает трудности расчета процесса теплоотдачи. Точное решение задачи о количестве

тепла, передаваемого от стенки к среде, связано с необходимостью определения температурного градиента у стенки и профиля изменения температур теплоносителя вдоль поверхности теплообмена, что весьма затруднительно. Поэтому для расчета непрерывного процесса теплоотдачи используют уравнение Ньютона:

$$Q = \alpha \cdot F(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}). \quad (2.11)$$

Здесь α - коэффициент теплоотдачи, который показывает какое количество тепла передается от 1 м² поверхности стенки к жидкости в течение 1 сек при разности температур между стенкой и жидкостью 1 град.

Он зависит от следующих факторов:

- скорости жидкости w , ее плотности ρ и вязкости μ , т.е. переменных, определяющих режим течения жидкости;
- тепловых свойств жидкости (удельной теплоемкости c_p , теплопроводности λ , коэффициента объемного расширения β).
- геометрических параметров - форма и определяющие размеры стенки (для труб - их диаметр d и длина L , шероховатость ε).

Таким образом:

$$\alpha = f(W, \mu, \rho, c_p, \lambda, \beta, d, L, \varepsilon). \quad (2.12)$$

Отсюда видно, что простота уравнения Ньютона только кажущаяся. Трудность заключается в расчете величины " α ". Кроме того, невозможно получить расчетное уравнение, пригодное для всех случаев теплоотдачи. Только путем обобщения опытных данных с помощью теории подобия можно получить обобщенные (критериальные) выражения для типовых случаев теплоотдачи, позволяющие рассчитать коэффициент теплоотдачи для конкретных условий. Исходной зависимостью для этого является общий закон распределения температур в жидкости, выраженный дифференциальным уравнением конвективного теплообмена.

2.5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА

В установившемся потоке жидкости выделим элементарный объем (в виде куба) с гранями dx , dy , dz . Примем, что плотность жидкости ρ , ее коэффициент теплопроводности α и удельная теплоемкость C постоянны, а температура t изменяется вдоль граней куба. Проекции скорости движения жидкости W на оси координат x , y , z составляют W_x , W_y , W_z соответственно.

Будем считать, что теплота переносится в жидкости путем конвекции и теплопроводности и затрачивается только на изменение энтальпии куба. Тогда конвективная составляющая теплового потока будет иметь вид:

$$dQ_{\text{конв}} = -\rho \cdot c \left(\frac{\partial t}{\partial x} W_x + \frac{\partial t}{\partial y} W_y + \frac{\partial t}{\partial z} W_z \right) \cdot dV \cdot d\tau, \quad (2.13)$$

где dV - объем куба.

Количество теплоты, вносимого в элементарный объем за время τ путем теплопроводности, составит:

$$dQ_{\text{тепл}} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \cdot dV \cdot d\tau. \quad (2.14)$$

Общее количество теплоты dQ , подводимое конвекцией и теплопроводностью:

$$dQ = dQ_{\text{конв}} + dQ_{\text{тепл}},$$

$$dQ = -\rho \cdot c \left(\frac{\partial t}{\partial x} W_x + \frac{\partial t}{\partial y} W_y + \frac{\partial t}{\partial z} W_z \right) \cdot dV \cdot d\tau + \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \cdot dV \cdot d\tau \quad (2.15)$$

Это количество тепла равно соответствующему изменению энтальпии элементарного куба:

$$dQ = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot dV \cdot d\tau, \quad (2.16)$$

После преобразований получим:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} W_x + \frac{\partial t}{\partial y} W_y + \frac{\partial t}{\partial z} W_z = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right), \quad (2.17)$$

где a - коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}. \quad (2.18)$$

Выражение является дифференциальным уравнением конвективного теплообмена и в общем виде выражает распределение температур в движущейся жидкости.

При установившемся процессе теплообмена:

$$\partial t / \partial \tau = 0. \quad (2.19)$$

Чтобы получить полное математическое описание процесса уравнение необходимо дополнить условиями на границе раздела потока и стенки аппарата. Выше мы рассматривали поток жидкости как двухслойную систему, состоящую из пограничного теплового слоя и ядра потока,двигающегося в турбулентном режиме. В пограничном слое теплота от стенки аппарата распространяется теплопроводностью. Это же количество теплоты передается ядру потока согласно закону Ньютона. Уравнение, характеризующее условия на границе имеет вид:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha (t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}). \quad (2.20)$$

Полученные выражения можно привести к расчетному виду только для простейших случаев. Поэтому обычно используют другой путь, заключающийся в том, что расчетные выражения получают из общих дифференциальных уравнений, применяя методы теории подобия. Их приводят к конкретному виду с помощью экспериментальных данных.

2.6. ТЕПЛОВОЕ ПОДОБИЕ

Рассмотрим сначала подобие граничных условий. Оно описывается с помощью критерия Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}. \quad (2.21)$$

Равенство критериев Nu характеризует подобие процессов теплопереноса на границе между стенкой и потоком жидкости. Он является мерой соотношения толщины пограничного слоя и определяющего геометрического размера. В критерий входит определяемая в задачах по конвективному теплообмену величина α .

Рассмотрим условия подобия в ядре потока. Оно описывается с помощью критерия Фурье, который характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, размерами канала, в котором происходит теплообмен, и физическими свойствами среды в нестационарных условиях:

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2}. \quad (2.22)$$

Равенство критериев Fo в сходных точках тепловых потоков является необходимым условием подобия неустановившихся процессов теплообмена.

Критерий Пекле показывает соотношение между количеством тепла, переносимым путем конвекции и теплопроводности при конвективном теплообмене:

$$Pe = \frac{W \cdot l}{a} = \frac{W \cdot l}{v} \cdot \frac{v}{a} = Re \cdot Pr. \quad (2.23)$$

Критерий Прандтля характеризует поле теплофизических величин потока жидкости:

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu}{a \cdot \rho}. \quad (2.24)$$

Критерий Грасгофа вводится при теплообмене в условиях естественной конвекции и показывает меру отношения сил трения к подъемной силе, определяемой разностью плотностей в различных точках потока:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2}, \quad (2.25)$$

где β - коэффициент объемного расширения жидкости, град⁻¹; Δt - разность температур горячих и холодных частиц жидкости, вызывающих естественную конвекцию, град.

Необходимыми условиями подобия переноса теплоты является соблюдение гидродинамического и геометрического подобия. Первое

характеризуется равенством критериев Re в сходственных точках подобных потоков, второе - постоянством отношения основных геометрических размеров стенки L_1, L_2, \dots, L_n к некоторому характерному размеру.

Таким образом, критериальное уравнение конвективного теплообмена выражается в виде:

$$Nu = f \left(Fo, Re, Pr, Gr, \frac{L_1}{L_0}, \frac{L_2}{L_0}, \dots, \frac{L_n}{L_0} \right). \quad (2.26)$$

Критерий Nu является определяемым, т.к. в него входит искомая величина коэффициента теплоотдачи α . При установившемся процессе теплообмена из критериального уравнения конвективного теплообмена исключают критерий Fo . При вынужденном установившемся движении влиянием критерия Gr на теплопередачу можно пренебречь

$$Nu = f \left(Re, Pr, \frac{L_1}{L_0}, \frac{L_2}{L_0}, \dots, \frac{L_n}{L_0} \right). \quad (2.27)$$

Вид функции определяется опытным путем, причем обычно ей придают степенную форму. Например, при движении потока в трубе диаметром d и длиной l уравнение примет вид:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} = c \cdot Re^m \cdot Pr^n \left(\frac{l}{d} \right)^p. \quad (2.28)$$

Величины c, m, n, p определяются по опытным данным. Коэффициент теплоотдачи α определяется по найденному из критериальных уравнений критерию Нуссельта.

2.7. ТЕПЛООТДАЧА БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ

Рассмотрим вынужденное движение внутри труб при турбулентном режиме ($Re > 10$).

Для геометрически подобных прямых труб:

$$\frac{\alpha \cdot d_{\text{ЭКВ}}}{\lambda_{\text{Ж}}} = Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}, \quad (2.29)$$

где $d_{экв} = 4S/\Pi$ (S - площадь поперечного сечения потока; Π - смоченный периметр сечения).

Для труб круглого сечения $d_{экв} = d$.

Значение α зависит от скорости потока (Re), с возрастанием которой уменьшается толщина теплового пограничного слоя, и его теплофизических свойств. При $l/d < 50$ вводится поправочный коэффициент.

В случае значительного изменения физических свойств теплоносителей в процессе теплообмена

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (2.30)$$

В формулу входит критерий Прандтля Pr при температуре стенки аппарата.

При наличии внутри аппарата змеевика появляется дополнительная турбулизация, для учета которой вводится поправочный коэффициент:

$$\alpha_R = \alpha \cdot \left(1 + 3,54 \cdot \frac{d}{D} \right), \quad (2.31)$$

где d - внутренний диаметр трубы; D - диаметр витка змеевика.

Ламинарный режим осложняется естественной конвекцией, который возникает вследствие разности температур по сечению потока:

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}. \quad (2.32)$$

Критерий Gr вводится для учета влияния естественной конвекции.

Особый интерес представляет теплоотдача при механическом перемешивании. Для аппаратов с мешалками, создающими преимущественно радиальные потоки жидкости:

$$Nu = c \cdot Re_{ц}^m \cdot Pr^n \left(\frac{\mu}{\mu_{ст}} \right)^{0,14}, \quad (2.33)$$

Критерий $Re_{ц}$ определен выражением

$$Re_{ц} = \frac{\rho \cdot n \cdot d_n^2}{\mu}, \quad (2.34)$$

где μ - вязкость среды при температуре стенки.

Уравнение получено для аппаратов без внутренних отражательных перегородок. Коэффициенты m , n , c находятся опытным путем.

При естественной конвекции нагретые частицы, имеющие меньшую плотность, поднимаются кверху. Их сменяют более холодные, которые опускаются вниз и, нагреваясь, также поднимаются вверх. В результате возникают конвекционные токи теплоносителя:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n. \quad (2.35)$$

2.8. ТЕПЛОТДАЧА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ

Определяющие размеры системы для процессов конденсации пара и кипения жидкостей различны. При конденсации пара определяющим будет линейный размер поверхности нагрева, измеряемый вдоль пути стекания конденсата (например, высота вертикальной поверхности H или наружный диаметр горизонтальной трубки d_n).

При кипении таким размером становится либо критический радиус образующегося пузырька пара R_k , либо его диаметр d_0 в момент отрыва от поверхности. При конденсации паров на поверхности нагрева обычно образуется сплошная пленка конденсата. Она стекает вниз в различных гидродинамических режимах. Поэтому интенсивность теплоотдачи зависит от толщины пленки конденсата и режима ее течения.

Для пленочной конденсации пара при ламинарном течении пленки:

$$Nu = c \cdot (Pr \cdot Ga \cdot Ku)^{0,25}, \quad (2.36)$$

где $c = 0,943$ - для вертикальных поверхностей ($l=H$); $c = 0,728$ - при конденсации на наружной поверхности горизонтальных труб ($l=d_n$).

Критерий фазового превращения Кутателадзе имеет вид

$$Ku = \frac{r_k}{c_k \cdot \Delta t}, \quad (2.37)$$

r_k - теплота конденсации, Дж/кг; c_k - теплоемкость конденсата, Дж/кг·град; Δt - разность между температурами пара и стенки, °К.

Критерий Галилея:

$$Ga = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2}. \quad (2.38)$$

2.9. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА ЧЕРЕЗ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Рассмотрим процесс теплопередачи между теплоносителями, разделенными плоской стенкой (рис.2.2.).

Определим количество теплоты Q передаваемое в единицу времени от горячего теплоносителя с температурой t_1 к холодному с температурой t_2 через разделяющую их стенку толщиной δ и коэффициентом теплопроводности λ . Температуры поверхностей стенки t_{CT1} и t_{CT2} соответственно. Коэффициенты теплоотдачи для горячего теплоносителя α_1 , а холодного - α_2 .

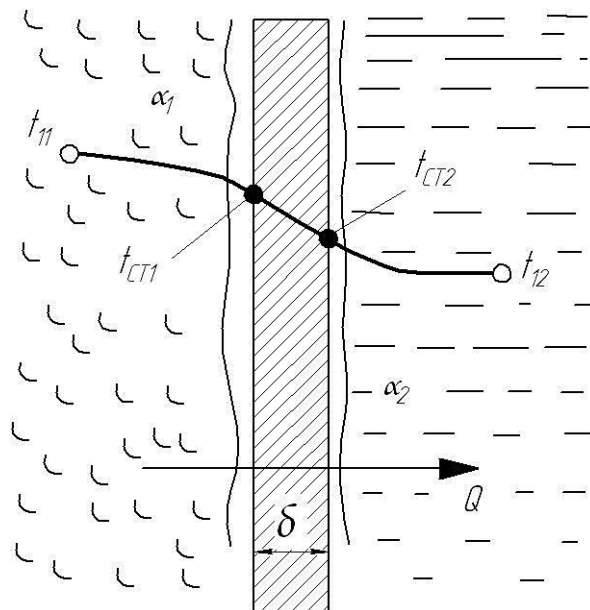


Рис. 2.2. Теплопередача через плоскую стенку

Примем, что процесс теплоотдачи установившийся. В этом случае одинаковое количество теплоты за одинаковое время передается от горячего теплоносителя к стенке, через нее и от стенки к холодному теплоносителю.

В рассматриваемом случае:

Количество теплоты, передаваемое через поверхность F от горячего теплоносителя к стенке, по закону Ньютона составит:

$$Q = \alpha_1(t_1 - t_{CT1})F. \quad (2.39)$$

Количество теплоты, проходящего путем теплопроводности через стенку толщиной δ и поверхностью F , по закону Фурье будет равно:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_{CT1}) \cdot F. \quad (2.40)$$

Количество теплоты, передаваемое через поверхность F от стенки к холодному теплоносителю, по закону Ньютона составит:

$$Q = \alpha_2(t_{CT2} - t_2) \cdot F. \quad (2.41)$$

Преобразуем эти уравнения следующим образом:

$$(t_1 - t_{CT1}) = \frac{Q}{\alpha_1 \cdot F}; \quad (2.42)$$

$$(t_{CT1} - t_{CT2}) = \frac{Q}{F} \cdot \frac{\delta}{\lambda}; \quad (2.43)$$

$$(t_{CT2} - t_2) = \frac{Q}{\alpha_2 \cdot F}. \quad (2.44)$$

Сложив левые и правые части этих уравнений, получим:

$$(t_1 - t_2) = \frac{Q}{F} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (2.45)$$

или

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot F(t_1 - t_2). \quad (2.46)$$

Коэффициент K равен:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2.47)$$

Величина, обратная K , называется общим термическим сопротивлением и обозначается R :

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (2.48)$$

где $\frac{1}{\alpha_1}$ - термическое сопротивление горячего теплоносителя;

$\frac{1}{\alpha_2}$ - термическое сопротивление холодного теплоносителя;

$\delta/\lambda = r_{cm}$ - термическое сопротивление стенки.

В случае многослойной стенки в уравнение вместо δ/λ подставляется сумма термических сопротивлений каждого слоя стенки.

Тогда:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2.49)$$

Для интенсификации процесса теплопередачи следует увеличивать меньший из коэффициентов теплоотдачи. Для этого, например, увеличивают скорость теплоносителя с меньшим α или турбулизируют поток другими способами.

2.10. ДВИЖУЩАЯ СИЛА ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Движущей силой процесса теплообмена является разность температур теплоносителей. Под действием этой разности тепло передается от горячего теплоносителя к холодному. При этом движущая сила не сохраняет своего постоянного значения, а изменяется вдоль поверхности теплообмена. Поэтому вводится понятие - средняя разность температур, при которой определяются численные значения физических параметров среды. Температуры теплоносителей изменяются по сечению потока вследствие наличия поля температур и скоростей, а также вдоль проточной части теплообменника по мере охлаждения горячей среды и нагревания холодной.

В частности, при конденсации пара и кипении жидкости, температуры теплоносителей принимаются постоянными, как температуры фазового превращения. Процессы теплообмена в аппаратах непрерывного действия могут осуществляться в прямотоке, противотоке, перекрестном и смешанном потоках.

При нагревании или охлаждении рабочей среды (без изменения агрегатного состояния) температура ее вдоль поверхности нагрева изменяется по экспоненциальным кривым (рис. 2.3.а,б).

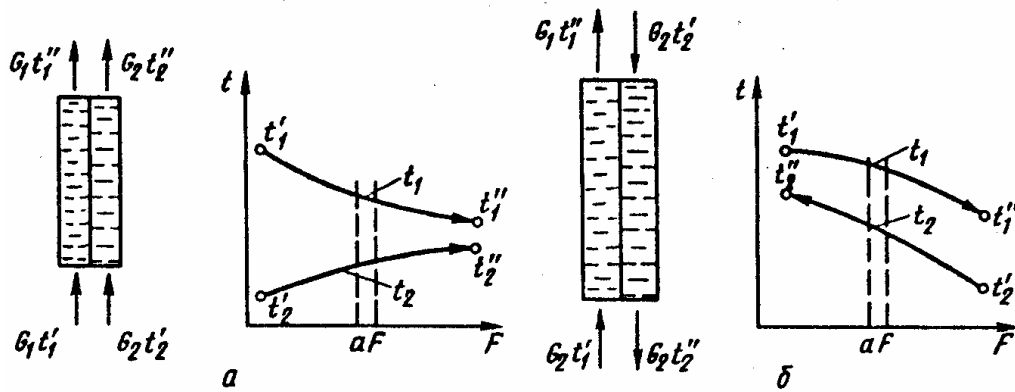


Рис. 2.3.Схемы относительного движения рабочих сред и изменения их температур вдоль поверхности нагрева:
а - прямоток; б- противоток

При простейших случаях теплопередачи - прямотоке и противотоке, средняя разность температур определяется по уравнению Грасгофа как средняя логарифмическая:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2,31 \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}} \quad (2.50)$$

Для прямотока:

$$\Delta t_6 = t_{1H} - t_{2H}; \quad (2.51)$$

$$\Delta t_M = t_{1K} - t_{2K}. \quad (2.52)$$

Для противотока:

$$\Delta t_6 = t_{1K} - t_{2K}; \quad (2.53)$$

$$\Delta t_M = t_{1H} - t_{2K}. \quad (2.54)$$

Наиболее совершенной схемой теплопередачи является противоток, при котором Δt имеет наибольшее значение из всех возможных схем теплопередачи при прочих равных условиях. При теплопередаче в противотоке нагреваемый поток может быть нагрет до более высокой температуры, чем конечная температура нагревающего потока. Наименьшее значение при прочих равных условиях имеет средняя разность температур при прямотоке.

При более сложных случаях относительного движения теплоносителей (перекрестный ток, неравное число ходов для обеих жидких сред и т.д.) в

расчетные формулы вводятся поправочные функции, численные значения которые находятся в справочниках.

2.11. КОНДЕНСАЦИЯ

Конденсацией называется переход вещества из паро- или газообразного состояния в жидкое, проводимое путем охлаждения его водой или холодным воздухом. Конденсация паров широко применяется в процессах переработки сельскохозяйственной промышленности при проведении процессов выпаривания, вакуум-сушки и др., для создания разрежения. При этом пары, подлежащие конденсации, обычно отводят в другой аппарат - конденсатор, где они охлаждаются водой или воздухом. Объем получаемого конденсата в тысячу и более раз меньше объема пара, из которого он образовался. Поэтому в конденсаторе создается разрежение, которое увеличивается при уменьшении температуры конденсации. Для поддержания вакуума на требуемом уровне из конденсатора непрерывно отводятся с помощью вакуум-насоса неконденсирующие газы.

По способу охлаждения различают два типа конденсаторов:

- смешения;
- поверхностные.

Конденсаторы смешения — это аппараты, где пар непосредственно смешивается с охлаждающей водой. По способу отвода воды, неконденсирующихся газов и конденсата различают сухие и мокрые конденсаторы смешения.

В сухих (барометрических) конденсаторах (рис.2.4.) вода и конденсат удаляются совместно, а газы отдельно с помощью вакуум-насоса. Внутри корпуса 1 взаимодействие пара и воды происходит в противотоке. Вода подается через штуцер в виде тонких струй перетекает с тарелки 2 на тарелку через отверстия и борта. Пар поступает снизу через штуцер и при соприкосновении с

водой конденсируется. Смесь конденсата и воды попадает в барометрическую трубу 3 высотой около 10 м и далее в колодец 4. Труба 3 и колодец играют роль гидравлического затвора, препятствующего проникновению наружного воздуха в аппарат. Несконденсировавшиеся газы отсасываются через штуцер 8 вакуум-насосом. Процесс конденсации пара протекает под вакуумом ($0,01 \dots 0,02 \text{ Мн/м}^2$).

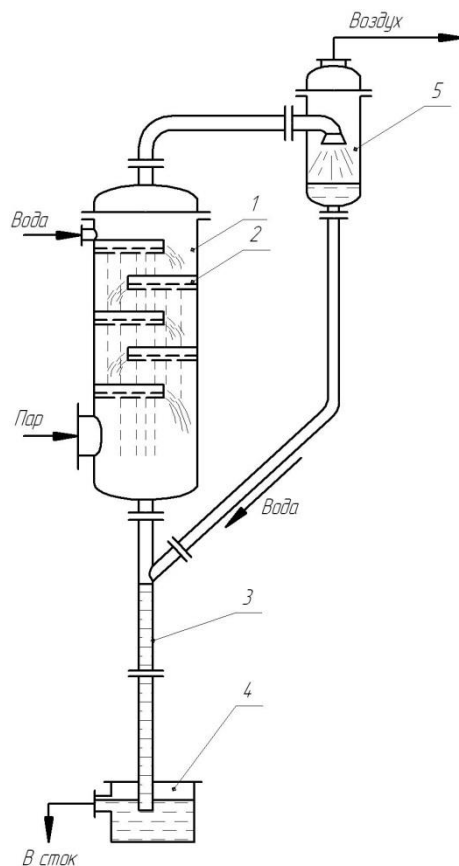


Рис.2.4. Барометрический конденсатор:

1-корпус; 2- тарелка; 3- барометрическая труба; 4 – колодец; 5 - ловушка

В поверхностных конденсаторах конденсирующийся пар отдает свое тепло через стенку. Обычно пар конденсируется на наружных или внутренних поверхностях труб, омываемых с противоположной стороны водой. Поэтому появляется возможность отдельного отвода конденсата и охлаждающей воды, что позволяет использовать конденсат, если он представляет собой какую-либо ценность. Например, если сжижение и охлаждение конечного продукта, получаемого в виде перегретого пара, является завершающей операцией технологического процесса.

Поверхностные конденсаторы более металлоемки и требуют большего расхода воды. В промышленности в качестве поверхностных конденсаторов используют различные теплообменники, например, трубчатые и оросительные холодильники-конденсаторы.

2.12. МЕТОД ФОРМАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Интенсивность теплообмена можно выразить как:

$$i = \frac{Q}{St} = K\Delta t = K \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{2,3 \lg \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}} = \frac{\Delta t_H - \Delta t_K}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right) 2,3 \lg \frac{\Delta t_H}{\Delta t_K}}, \quad (2.55)$$

где K – коэффициент теплопередачи; S – поверхность теплообмена; t – время; Δt – средняя разность температур; $\Delta t_H, \Delta t_K$ – начальная и конечная разность температур между теплоносителями; α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи; δ_i – толщина стенки, осадка, загрязнений; λ_i – теплопроводность стенки, осадка, загрязнений.

Эту зависимость можно использовать для составления наглядной схемы действий по интенсификации конкретного теплообменного процесса, обозначив \uparrow – необходимость увеличения и \downarrow – необходимость уменьшения того или иного параметра.

Зависимость (2.1) можно записать в виде:

$$i \uparrow = \Delta t_H \uparrow, \Delta t_K \downarrow, \alpha_1 \uparrow, \delta_i \downarrow, \lambda_i \uparrow, \alpha_2 \uparrow. \quad (2.56)$$

Такая схема наглядно показывает направление изменения тех или иных параметров процесса или конструктивных характеристик аппарата для интенсификации процесса теплообмена.

Необходимо увеличивать коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 для обоих теплоносителей, теплопроводность материала аппарата и инкрустации λ_1 , начальную разность температур Δt_H ; уменьшать конечную разность температур

между теплоносителями Δt_K и толщину стенки теплопередающей поверхности и загрязнений δ_i .

Анализ процесса и выявление лимитирующего уровня в соответствии с изложенным выше методом позволяют отобрать из формулы (2.56) факторы, соответствующие по масштабу лимитирующему уровню. Анализ формализованных зависимостей необходимо проводить с целью повышения энергоэффективности технологического процесса.

Для определения дальнейшего направления интенсификации рассмотрим уравнения теплопереноса и используем одно из известных выражений для α_1 и α_2 в виде критериальной зависимости:

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} A Re^{0,8} Pr^{0,33} (Pr/Pr_{CT})^{0,25}. \quad (2.57)$$

Откуда, не учитывая $(Pr/Pr_{CT})^{0,25}$, получаем

$$\alpha = A \lambda^{0,67} V^{0,8} l^{-0,2} \rho^{0,8} C_p^{0,33} \mu^{-0,47}, \quad (2.58)$$

где λ – теплопроводность теплоносителя; l – определяющий линейный размер (например, толщина слоя теплоносителя); $Re = V l \rho / \mu$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \mu / (\rho \alpha)$ – критерий Прандтля; V – скорость; $a = \lambda / (C_p \rho)$ – коэффициент температуропроводности; ρ – плотность; C_p – теплоемкость.

Тогда формула (2.58) примет вид:

$$i = \Delta t_n \uparrow \Delta t_k \downarrow \delta_{ст} \downarrow \lambda_{ст} \uparrow \lambda_{загр} \uparrow \delta_{загр} \downarrow \lambda_1 \uparrow V_1 \uparrow \rho_1 \uparrow C_{p2} \uparrow l_1 \downarrow \mu_1 \downarrow \lambda_2 \uparrow V_2 \uparrow \rho_2 \uparrow C_{p2} \uparrow l_2 \downarrow \mu_2 \downarrow. \quad (2.59)$$

Индексы 1 и 2 относятся к характеристикам потоков двух теплоносителей.

Программа интенсификации ТП включает в себя как режимно - технологические, так и аппаратно-конструктивные характеристики теплообменного процесса на различных уровнях иерархии системы.

Глава 3. ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью переноса вещества (массы) из одной фазы в другую, называются массообменными процессами, а аппаратура, предназначенная для проведения этих процессов, - массообменной аппаратурой.

В массообменном аппарате могут производиться разнообразные процессы. Основными и важнейшими из них являются абсорбция, экстракция, ректификация, адсорбция и сушка.

Абсорбция – избирательное поглощение газов или паров жидкими поглотителями – абсорбентами. Процесс используется во многих производствах, где из смеси газов необходимо извлечь какой либо компонент или группу компонентов. В этом процессе имеет место переход вещества или группы веществ из газовой или паровой фазы в жидкую.

Экстракция (жидкостная) – извлечение растворённого в одной жидкости вещества или группы веществ другой жидкостью. Процесс используется в случаях, когда из раствора необходимо извлечь растворённое вещество или группу веществ. В этом процессе имеет место переход вещества из одной жидкой фазы в другую жидкую фазу.

Ректификация – разделение жидкой смеси на чистые или обогащённые составляющие в результате противоточного взаимодействия потоков пара и жидкости. Процесс имеет большое значение в тех производствах, где необходимо частичное или полное разделение жидких однородных смесей на чистые компоненты или их группы. Очевидно, в этом процессе имеет место переход вещества из жидкой фазы в паровую, и наоборот.

Адсорбция – избирательное поглощение газов, паров или растворённых в жидкостях веществ твёрдым поглотителем – адсорбентом, способным

поглощать одно или несколько веществ из их смеси. Процесс используется во многих производствах, где из смеси газов, паров или растворённых веществ необходимо извлечение того или другого вещества. В этом процессе вещества переходят из газовой или жидкой фаз в твёрдую.

Сушка – удаление влаги из твёрдых влажных материалов путём её испарения. При этом процессе имеет место переход влаги из твёрдого влажного материала в паровую или газовую среду.

Для всех перечисленных процессов общим является переход вещества из одной фазы в другую, или массопередача. Переход вещества из одной фазы в другую связан с явлениями конвективного переноса и молекулярной диффузии, поэтому перечисленные выше процессы получили название массообменных, или диффузионных процессов.

Массопередача – переход вещества (или нескольких веществ) из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия.

В массообмене участвуют как минимум три вещества: распределяющее вещество (или вещества), составляющее первую фазу; распределяющее вещество (или вещества), составляющее вторую фазу; распределяемое вещество, (или вещества), которое переходит из одной фазы в другую.

Через определённый промежуток времени скорости перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую и обратно становятся одинаковыми. Такое состояние называется равновесным. В состоянии равновесия в каждом конкретном случае существует строго определённая зависимость между концентрациями распределяемого вещества, которые при равновесии системы называются равновесными.

Так как концентрация пропорциональна числу частиц, то, следовательно, скорость перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую пропорциональна разности между фактической концентрацией распределяемого вещества в данной фазе и равновесной концентрацией.

Основными вопросами, изучаемыми в массопередаче, являются: законы фазового равновесия, позволяющие установить равновесные концентрации и направление течения процесса; движущая сила массообменных процессов; коэффициенты скорости массообменных процессов.

Два последних вопроса составляют так называемую кинетику массопередачи и рассматриваются самостоятельно; вопросы фазового равновесия, рассматриваются отдельно при изучении каждого конкретного процесса.

3.2. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

В общем виде материальный баланс массообменных (диффузионных) процессов может быть составлен на основе следующих рассуждений. Обозначим весовые скорости распределяющих фаз вдоль поверхности их раздела, выраженные в килограммах инертного вещества в час, через G и L , а концентрация распределяемого вещества соответственно \bar{Y} кг/кг инертного вещества и \bar{X} кг/кг инертного вещества.

$$\bar{Y} = -\frac{L}{G} \bar{X} + \frac{L\bar{X}_H - G\bar{Y}_H}{G}. \quad (3.1)$$

Для противоточного взаимодействия фаз может быть получено уравнение:

$$\bar{Y} = \frac{L}{G} \bar{X} + \frac{G\bar{X}_H - L\bar{Y}_H}{G}. \quad (3.2)$$

Из этих уравнений следует, что концентрации распределяемого вещества в фазах G и L связаны линейной зависимостью. Поэтому удобно процессы массообмена представлять графически в координатах $\bar{X} - \bar{Y}$, то есть в виде зависимости между так называемыми рабочими концентрациями. Уравнение прямой, выражающей зависимость между рабочими концентрациями, называют обычно рабочей линией процесса.

Движущая сила массообменных процессов определяется степенью отклонения от равновесия или «расстоянием» от равновесия. Последнее определяется разностью между рабочей и равновесной концентрациями или равновесной и рабочей, в зависимости от того, какие из них больше. Движущую силу можно выражать либо через концентрации распределяемого вещества в фазе G , то есть через \bar{Y} , либо через концентрации его в фазе L , то есть через \bar{X} .

Во всех случаях, движущей силой процесса будет разность между рабочей и равновесной концентрациями, взятая с положительным знаком.

Из изложенного следует, что основное уравнение массопередачи можно записать двояко:

$$dM = K_Y \Delta \bar{Y} dF = K_X \Delta \bar{X} dF \quad (3.3)$$

и

$$K_Y \Delta \bar{Y} = K_X \Delta \bar{X}. \quad (3.4)$$

Движущая сила меняется с изменением рабочих концентраций, поэтому для всего процесса массообмена, протекающего в пределах изменения концентраций от начальных до конечных, должна быть определена величина средней движущей силы.

При определении величины средней движущей силы могут встретиться два случая:

- 1) зависимость между равновесными концентрациями не линейна; для этого случая равновесная концентрация определяется общей функциональной зависимостью $\bar{Y}_p = f(\bar{X})$;

Величина средней движущей силы для случая $\bar{Y}_p = f(\bar{X})$.

$$\Delta \bar{Y}_m = \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_K}{\int_{\bar{Y}_K}^{\bar{Y}_H} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}_p}}, \quad \Delta \bar{X}_m = \frac{\bar{X}_K - \bar{X}_H}{\int_{\bar{X}_K}^{\bar{X}_H} \frac{d\bar{X}}{\bar{X}_p - \bar{X}}}. \quad (3.5)$$

Подобная структура уравнений сохранится и в тех случаях, когда вместо концентраций используют другие параметры, характеризующие систему: энтальпию, химический потенциал.

2) зависимость между равновесными концентрациями линейна, то есть

$$\bar{Y}_p = A_p \bar{X} \text{ (где } A_p \text{ - постоянная величина).}$$

В случае когда между равновесными и рабочими концентрациями существует прямолинейная зависимость, для определения средней движущей силы и числа единиц переноса могут быть выведены более простые соотношения.

$$\Delta \bar{Y}_m = \frac{(\bar{Y}_H - \bar{Y}_{PH}) - (\bar{Y}_K - \bar{Y}_{PK})}{\ln \frac{\bar{Y}_H - \bar{Y}_{PH}}{\bar{Y}_K - \bar{Y}_{PK}}} = \frac{\Delta \bar{Y}_H - \Delta \bar{Y}_K}{2,31 \lg \frac{\Delta \bar{Y}_H}{\Delta \bar{Y}_K}}, \quad (3.6)$$

где $\Delta \bar{Y}_H = \bar{Y}_H - \bar{Y}_{PH}$ - движущая сила в начале поверхности фазового контакта;

$\Delta \bar{Y}_K = \bar{Y}_K - \bar{Y}_{PK}$ - движущая сила в конце поверхности фазового контакта.

$$\Delta \bar{X}_m = \frac{(\bar{X}_{PK} - \bar{X}_K) - (\bar{X}_{PH} - \bar{X}_H)}{\ln \frac{\bar{X}_{PK} - \bar{X}_K}{\bar{X}_{PH} - \bar{X}_H}} = \frac{\Delta \bar{X}_K - \Delta \bar{X}_H}{2,31 \lg \frac{\Delta \bar{X}_K}{\Delta \bar{X}_H}}, \quad (3.7)$$

где $\Delta \bar{X}_H = \bar{X}_{PH} - \bar{X}_H$ - движущая сила в начале поверхности фазового контакта;

$\Delta \bar{X}_K = \bar{X}_{PK} - \bar{X}_K$ - движущая сила в конце поверхности фазового контакта.

Следовательно, для прямолинейной равновесной зависимости средняя движущая сила процесса определяется как средняя логарифмическая между движущими силами в начале и в конце поверхности фазового контакта.

3.3. МОДИФИЦИРОВАННЫЕ УРАВНЕНИЯ МАССОПЕРЕДАЧИ

В некоторых массообменных аппаратах поверхность соприкосновения фаз G и L , или поверхность фазового контакта, легко определяется простым геометрическим вычислением; в других аппаратах эта поверхность геометрически неопределима. В первом случае для расчёта аппаратуры

наиболее целесообразно применение основного уравнения массопередачи, во втором – модифицированных уравнений.

Если поверхность фазового контакта массообменного аппарата геометрически неопределима, основной технической характеристикой его может служить объём, высота или число ступеней фазового контакта.

Если в качестве основной характеристики аппарата выбирается его объём, основное уравнение массопередачи целесообразно видоизменить следующим образом. Пусть V (в м^3) – объём аппарата и σ (в $\text{м}^2/\text{м}^3$) – удельная поверхность фазового контакта, развиваемая в 1 м^3 объёма. Поверхность фазового контакта: $F = V\sigma$ и, следовательно:

$$V = \frac{M}{\Delta \bar{Y}_m K_Y \sigma} = \frac{M}{\Delta \bar{Y}_m K_{YV}} = \frac{M}{\Delta \bar{X}_m K_{XV}}, \quad (3.8)$$

где $K_{YV} = K_Y \sigma$, $K_{XV} = K_X \sigma$ - объёмные коэффициенты массопередачи.

Очень часто за основную характеристику аппарата принимают его высоту.

Обозначим через f , м^2 площадь сечения аппарата, а через H , м его высоту; тогда $F = Hf\sigma$.

$$H = \frac{G}{K_Y f \sigma} \int_{\bar{Y}_K}^{\bar{Y}_H} \frac{d\bar{Y}}{\bar{Y} - \bar{Y}_P} = h_Y m_Y = h_X m_X, \quad (3.9)$$

где $h_Y = \frac{G}{K_Y f \sigma}$, $h_X = \frac{G}{K_X f \sigma}$.

Эти уравнения могут быть сопоставлены с основным уравнением массопередачи, написанным в форме

$$\frac{F}{M} = \frac{1}{K_Y} \cdot \frac{1}{\Delta \bar{Y}_m}. \quad (3.10)$$

Сопоставление уравнений показывает, что высота, эквивалентная единице переноса, имеет смысл величины, обратной коэффициенту массопередачи, а число единиц переноса – величины, обратной движущей силе процесса.

Для определения числа единиц переноса в качестве вспомогательного приёма может служить способ определения числа ступеней изменения рабочих концентраций.

Допуская, что в пределах одной ступени можно с некоторым приближением принять существование линейной равновесной зависимости, для определения общего числа единиц переноса можно предложить равенство:

$$m_Y = \sum_1^n m_{0Y} = \sum_1^n \frac{Y_H - Y_K}{\Delta Y_m}. \quad (3.11)$$

3.4. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ МАССОПЕРЕДАЧИ

В процессах переноса распределяемого вещества (массы) из одной фазы в другую надлежит различать два случая:

1. перенос из потока жидкости в поток жидкости, или массообмен между потоками жидкости;
2. перенос из твёрдого тела в поток жидкости (или перенос в обратном направлении), то есть массообмен между твёрдой фазой, содержащей внутри пор или капилляров распределяемое вещество, и потоком жидкости.

Элементарными законами, которым подчиняется перенос распределяемого вещества из одной фазы в другую, является закон молекулярной диффузии, закон массоотдачи и закон массопроводности.

Закон молекулярной диффузии (первый закон Фика). Количество продиффундировавшего вещества пропорционально градиенту концентраций, площади, перпендикулярной направлению диффузионного потока, и времени:

$$dM = -D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} dF d\tau, \quad (3.12)$$

где dM - количество продиффундировавшего вещества, $\frac{\partial \bar{C}}{\partial x}$ - градиент концентрации в направлении диффузии; dF - элементарная площадка, через которую происходит диффузия; $d\tau$ - время диффузии; D - коэффициент пропорциональности, или коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии показывает, какое количество вещества диффундирует через поверхность в 1 м^2 в течение 1 ч при разности концентраций на расстоянии 1 м , равной единице.

Знак минус в правой части уравнения показывает, что при молекулярной диффузии в направлении перемещения вещества концентрация убывает.

Коэффициент диффузии не является постоянной величиной; численные значения его обычно берут из справочников или находят по следующим формулам:

для газов:

$$D = 0,00155 \frac{T^{\frac{3}{2}}}{p \left(V_A^{\frac{1}{3}} + V_B^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}; \quad (3.13)$$

для жидкостей:

$$D = 0,00278 \frac{T^{\frac{3}{2}}}{AB \sqrt{\mu} \left(V_A^{\frac{1}{3}} + V_B^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}, \quad (3.14)$$

где T - абсолютная температура в $^{\circ}\text{K}$; p - давление в атм; V_A и V_B - мольные объёмы взаимодействующих веществ A и B ; M_A и M_B - молекулярные веса взаимодействующих веществ; μ - вязкость жидкости, в которой происходит диффузия, в спз; A и B - опытные константы, зависящие от природы вещества. Коэффициент диффузии зависит, прежде всего, от агрегатного состояния систем: так, коэффициент диффузии для газов примерно на четыре порядка выше, чем для жидкостей. Коэффициент диффузии увеличивается с ростом температуры и уменьшается с повышением давления.

Для концентрированных растворов:

$$D_k = D \frac{d \ln a}{d \ln \bar{C}} = D \left(1 + \frac{d \ln \gamma}{d \ln \bar{C}} \right), \quad (3.15)$$

где D_k - коэффициент диффузии в растворе с концентрацией \bar{C} ; a - активность диффундирующего вещества; \bar{C} - концентрация диффундирующего вещества; γ - коэффициент активности.

Дифференциальное уравнение молекулярной диффузии (второй закон Фика)

$$dM = D \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right) dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau. \quad (3.16)$$

С другой стороны, ту же прибыль качества диффундирующего вещества в элементе параллелепипеда можно найти умножением объёма элемента на изменение концентрации за время $d\tau$, то есть:

$$dM = dx \cdot dy \cdot dz \cdot \frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} d\tau. \quad (3.17)$$

Сопоставляя соотношения (3.16) и (3.17), получим дифференциальное уравнение молекулярной диффузии:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right). \quad (3.18)$$

Закон массоотдачи (закон Шукарёва). Закон Шукарёва может быть сформулировать так: количество вещества, перенесённого от поверхности раздела фаз в воспринимающую фазу, пропорционально разности концентраций у поверхности раздела фаз и в ядре потока воспринимающей фазы, поверхности фазового контакта и времени.

$$dM = \beta (\bar{C}_r - \bar{C}_f) F d\tau, \quad (3.19)$$

где β - коэффициент массоотдачи, характеризующий перенос вещества конвективными и диффузионными потоками одновременно; \bar{C}_r - концентрация в воспринимающей фазе у поверхности раздела фаз; \bar{C}_f - концентрация в ядре потока воспринимающей фазы; остальные обозначения прежние. При этом

важно отметить, что концентрация на границе \bar{C}_r рассматривается как равновесная концентрация.

Коэффициент массоотдачи показывает, какое количество вещества передаётся от поверхности раздела фаз в воспринимающую фазу через 1 м² поверхности фазового контакта в течение 1 ч при разности концентраций 1 кг/м³.

Дифференциальное уравнение массоотдачи:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \omega_z = D \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right). \quad (3.20)$$

Критериальное уравнение конвективной диффузии. Выведенное дифференциальное уравнение (3.20) является математическим описанием процесса перемещения вещества в жидкой (газовой, паровой) фазе конвективной диффузией. Для полного математического описания процесса это уравнение должно быть дополнено уравнением, характеризующим условия на границе рассматриваемой фазы. Количества вещества, перемещающегося из фазы в фазу у границы, можно определить исходя из основного закона конвективной диффузии: $dM = \beta(\bar{C}_r - \bar{C}_f) dF d\tau$, или, обозначая $\bar{C}_r - \bar{C}_f = \Delta \bar{C}$, получим:

$$dM = \beta \Delta \bar{C} dF d\tau. \quad (3.21)$$

Это же количество вещества dM может быть определено другим способом. У поверхности раздела фаз вещество переходит в другую фазу за счёт молекулярной диффузии. На этом участке пути количество переданного из фазы в фазу вещества dM можно найти исходя из основного закона молекулярной диффузии:

$$dM = -D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} dF d\tau. \quad (3.22)$$

Очевидно, что величина dM в последнем уравнении и в уравнении (3.21) представляет собой одно и то же количество вещества, выраженное различными способами, и, следовательно:

$$\beta \Delta \bar{C} = -D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} . \quad (3.23)$$

Уравнения (3.20) и (3.23) не разрешимы для встречающихся в практике случаев и, следовательно, не могут служить для непосредственного определения численных значений коэффициентов массоотдачи. Поэтому в расчётной практике пользуются критериальными уравнениями, полученными из уравнений (3.21) и (3.23).

Для получения диффузионных критериев подобия преобразуем уравнения (3.20) и (3.23) методами теории подобия. Из уравнения (3.23) делением обеих частей уравнения на правую часть получим безразмерный комплекс:

$$\frac{\beta \Delta \bar{C} \partial x}{D \partial \bar{C}} .$$

Вычеркнув в полученном комплексе символы дифференцирования, разности и направления (замена x на не ориентированный в определённом направлении линейный размер l), после сокращения получаем диффузионный критерий Нуссельта:

$$Nu_D = \frac{\beta l}{D} . \quad (3.24)$$

Из дифференциального уравнения конвективной диффузии:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} + \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \omega_y + \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} \omega_z = D \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right)$$

получаем безразмерные комплексы делением всех членов уравнения на $D \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2}$:

$$\frac{\partial \bar{C} \partial x^2}{\partial \tau \cdot D \partial^2 \bar{C}} ; \frac{\partial \bar{C} \omega_x \partial x^2}{\partial x \cdot D \partial^2 \bar{C}} .$$

Вычеркнув в полученных комплексах символы дифференцирования (включая символы порядка дифференцирования) и направления, после сокращений получаем диффузионный критерий Фурье:

$$\frac{1}{F_{0D}} = \frac{l^2}{D\tau} \text{ или } F_{0D} = \frac{D\tau}{l^2}. \quad (3.25)$$

Диффузионный критерий Пекле:

$$Pe_D = \frac{\omega l}{D}. \quad (3.26)$$

Критерий F_{0D} характеризует изменение скорости потока диффундирующей массы во времени; он необходим только для характеристики нестационарных процессов диффузии.

Критерий Pe_D обычно преобразовывают и представляют его в виде произведения двух критериев:

$$Pe_D = \frac{\omega l}{D} = \frac{\omega l}{v} \cdot \frac{v}{D} = Re Pr_D.$$

Re является критерием гидродинамического подобия, а новый критерий Pr_D - диффузионный критерий Прандтля – находится лишь по физическим параметрам и характеризует подобие полей физических величин:

$$Pr_D = \frac{v}{D} = \frac{\mu}{D\rho} = \frac{\mu g}{D\gamma}. \quad (3.27)$$

В случаях, когда массообмен протекает в условиях естественной конвекции, вызванной разностью плотностей растворов с различной концентрацией, для характеристики процесса вместо критерия Re (или дополнительно к нему) вводят критерий Грасгофа.

Полученный критерий подобия даёт возможность найти критериальное уравнение конвективной диффузии:

$$f(Re, Gr, Nu_D, Pr_D, F_{0D}) = 0. \quad (3.28)$$

Из всех критериев уравнения (3.28) только Nu_D не состоит целиком из условий однозначности, поэтому он является определяемым критерием. Исходя из этого уравнение (3.28) представляется в виде:

$$Nu_D = f(Re, Gr, Pr_D, F_{0D}). \quad (3.29)$$

Применительно к конкретным задачам массообмена общее критериальное уравнение (3.29) может быть упрощено. При рассмотрении стационарных процессов массообмена из критериального уравнения выпадает критерий $F_{0д}$, и оно имеет вид:

$$Nu_{д} = f(Re, Gr, Pr_{д}). \quad (3.30)$$

При вынужденном движении потока фазы естественной конвекции можно пренебречь, тогда из уравнения выпадает критерий Gr :

$$Nu_{д} = f(Re, Pr_{д}) \quad (3.31)$$

или

$$Nu_{д} = A Re^n Pr^m. \quad (3.32)$$

В условиях естественной конвекции фазы из уравнения выпадает критерий Re :

$$Nu_{д} = f(Gr, Pr_{д}) \quad (3.33)$$

или

$$Nu_{д} = A Gr^n Pr^m \quad (3.34)$$

По найденным из критериальных уравнений значениям $Nu_{д}$ легко определяют коэффициенты массоотдачи:

$$\beta = Nu_{д} \frac{D}{l}, \quad (3.35)$$

а по ним и коэффициенты массопередачи.

Выражение коэффициента массопередачи через коэффициенты массоотдачи.

Определение коэффициента массопередачи K_Y :

$$K_Y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_Y} + \frac{A_P}{\beta_X}}. \quad (3.36)$$

Определение коэффициента массопередачи K_X :

$$K_x = \frac{1}{\frac{1}{A_p \beta_Y} + \frac{1}{\beta_X}} . \quad (3.37)$$

$$A_p = \operatorname{tg} \alpha .$$

Коэффициент массоотдачи представляет собой величину, которая учитывает сопротивление переносу вещества за счёт молекулярной диффузии, а также сопротивление переносу потоками жидкости, то есть чисто конвективному переносу. Следовательно, на величину коэффициентов массоотдачи оказывают влияние все те факторы, которые определяют скорость молекулярной диффузии, а также скорость конвективного переноса.

3.5. МАССОПЕРЕДАЧА В СИСТЕМАХ С ТВЁРДОЙ ФАЗОЙ

Массопередача в системах с твёрдой фазой представляет собой особенно сложный процесс. В этом процессе, кроме массоотдачи от поверхности раздела фазы в поток жидкости (газа, пара), имеет место и перемещение вещества в твёрдой фазе массопроводностью.

К указанным процессам представляется возможным отнести процессы адсорбции, сушки и выщелачивания (извлечение вещества растворителем из пор твёрдого тела).

Количество вещества, переместившегося в твёрдой фазе за счёт массопроводности, пропорционально градиенту концентрации, площади, перпендикулярной направлению потока вещества, и времени, то есть:

$$dM = -K \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} dF d\tau .$$

В этом уравнении коэффициент пропорциональности K ($\text{м}^2/\text{ч}$), имеющий размерность коэффициента диффузии, может быть назван коэффициентом массопроводности.

При принятом законе массопроводности процесс перемешивания вещества внутри твёрдой фазы может быть описан дифференциальным уравнением массопроводности:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial \tau} = K \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial z^2} \right). \quad (3.38)$$

Коэффициент массопроводности зависит от природы проходящего процесса (адсорбция, сушка, выщелачивание), от ряда факторов, определяющих величину коэффициента молекулярной диффузии, и от структуры твёрдого пористого тела.

Диффузионный критерий Био:

$$Bi_D = \frac{\beta l}{K}.$$

Диффузионный критерий Фурье:

$$F_{0D} = \frac{K \tau}{l^2},$$

характеризующий изменение скорости потока вещества, перемещаемого массопроводностью в твёрдом теле.

Диффузионные критерии Bi_D и F_{0D} должны войти в критериальное уравнение, которое описывает перемещение вещества в твёрдой фазе и является теоретической базой для обработки всех опытных исследований этого процесса. Дифференциальное уравнение массопроводности для простейших случаев одномерного перемещения вещества имеет аналитическое решение в виде:

$$E = \frac{\bar{C} - \bar{C}_p}{\bar{C}_H - \bar{C}_p} = f \left(Bi_D, F_{0D}, \frac{x}{\delta} \right), \quad (3.39),$$

где $\frac{\bar{C} - \bar{C}_p}{\bar{C}_H - \bar{C}_p}$ - параметрический критерий, представляющий собой безразмерную концентрацию распределяемого вещества в твёрдой фазе в точке с координатой x ; \bar{C} - концентрация в точке с координатой x в момент времени τ , соответствующий определённому F_{0D} ; δ - коэффициент, определяющий размер

тела, составляющего твёрдую фазу; x/δ - безразмерная координата точки, в которой концентрация равна

3.6. МЕТОД ФОРМАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ТП

Если использовать основное уравнение процесса массопереноса, то для наиболее распространенных тарельчатых массообменных аппаратов фактор интенсивности можно определить по формуле

$$i = M / \nu = KS\Delta C / \nu, \quad (3.40)$$

где M – масса вещества, перенесенного в единицу времени; $\nu = n(\nu_{\text{б}} + \nu_{\text{с}}) = nS(H_{\text{б}} + H_{\text{с}})$ – объем тарельчатого аппарата; n – число секций в аппарате; $\nu_{\text{б}}$, $\nu_{\text{с}}$ – соответственно объем рабочей (например, барботажной) и сепарационной зон одной секции аппарата; S – площадь поверхности полотна тарелки; $H_{\text{б}}$, $H_{\text{с}}$ – соответственно высота барботажной и сепарационной зон; K – коэффициент массопередачи, отнесенный к 1 м² полотна тарелки; ΔC – разность концентраций (движущая сила процесса).

Для противоточного аппарата, считая коэффициент массопередачи независимым от концентрации, запишем

$$i = K\Delta C / [n(H_{\text{б}} + H_{\text{с}})]. \quad (3.41)$$

Из формулы (3.41) видно, что на величину фактора интенсивности оказывает влияние параметр K , характеризующий кинетику массообменного процесса, параметры ΔC и n , тесно связанные со статическими характеристиками процесса, в частности, с равновесием между фазами, определяемые термодинамическими свойствами компонентов системы, а также параметрами $H_{\text{б}}$ и $H_{\text{с}}$. Последние зависят в основном от конструктивных

особенностей аппарата и физико-химических свойств перерабатываемых продуктов. Если использовать понятие эффективности ступени контакта η , то

$$i = \eta K \Delta C / [n_m (H_\delta + H_c)], \quad (3.42)$$

где n_m – число необходимых теоретических ступеней контакта.

Тогда алгоритм интенсификации массо-обменного процесса можно записать так:

$$i \uparrow = \eta \uparrow K \uparrow \Delta C \uparrow n_m \downarrow H_\delta \downarrow H_c \downarrow. \quad (3.43)$$

Если анализ показывает, что лимитирующим является молекулярный уровень, то необходимо искать пути увеличения коэффициента массопередачи K .

Для того чтобы учесть энерго- и материалоемкость технологической системы, введем в качестве параметра, характеризующего интенсивность ТП, удельную производительность, т.е. производительность, отнесенную к количеству энергии и времени, затраченных на реализацию процесса, объем или площадь аппарата:

$$u = \frac{M}{Et \nu(S)}, \quad (3.44)$$

Метод формального анализа параметров, влияющих на интенсивность ТП, показывает направление общего подхода при первичном рассмотрении технологической системы с целью ее модернизации и повышении энергоэффективности.

Глава 4. ЗАКОНЫ РАВНОВЕСИЯ. РАВНОВЕСНОЕ СОСТОЯНИЕ. НАПРАВЛЕНИЕ ПРОТЕКАНИЯ И ДВИЖУЩАЯ СИЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Основная задача технологических процессов тепломассообмена состоит в направленном (заданном) изменении макроскопических свойств участвующих в этом процессе веществ: состава, агрегатного состояния, температуры, давления. Для этого на систему воздействуют подачей или отводом теплоты, внешними силовыми полями, перемещением под действием силы давления и т. п., что приводит к переносу субстанций – энергий, массы, импульса. Предельным состоянием системы является подвижное равновесие, которое не приводит к изменению макроскопических свойств участвующих в процессе веществ во времени и пространстве. Таким образом, равновесным называют такое состояние системы, при котором перенос субстанций отсутствует. Законы равновесия при решении инженерных задач применяют для определения направления протекания и величины движущей силы.

Величина движущей силы является определяющим фактором энергоэффективности тепломассообменных процессов.

4.1. УСЛОВИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ И МАССОПЕРЕНОСА

Условия равновесия в процессах переноса теплоты (теплового равновесия) определяют сравнительно простыми измерениями температур соприкасающихся фаз.

Намного сложнее определение условия равновесия системы в процессах переноса массы. Поэтому данному виду равновесия будет уделено основное внимание.

Процесс перехода массы из одной фазы в другую в изолированной замкнутой системе, состоящей из двух или большего числа фаз, возникает

самопроизвольно и протекает до тех пор, пока между фазами при данных условиях (температуре и давлении) установится подвижное фазовое равновесие. Оно характеризуется тем, что в единицу времени из первой фазы во вторую переходит столько же молекул компонента, сколько из второй в первую (т. е. преимущественного перехода вещества из одной фазы в другую нет). Достигнув состояния равновесия, система может находиться в нем без количественных и качественных изменений сколь угодно долго, пока какое-либо внешнее воздействие не выведет ее из этого состояния. Таким образом, состояние изолированной системы при равновесии определяется только внутренними условиями. Поэтому градиенты интенсивных параметров и соответствующие им потоки должны быть равны нулю:

$$dT=0; \quad dP = 0; \quad d\mu_i = 0, \quad (4.1)$$

где T – температура; P – давление; μ_i – химический потенциал 1-го компонента.

Выражения (4.1) называют условиями соответственно термического, механического и материального равновесия.

Из второго закона термодинамики следует, что в самопроизвольных процессах энтропия S системы возрастает и в условии равновесия достигает максимального значения, т.е. в этом случае

$$dS = 0 \quad (4.2)$$

Уравнения (4.1), а также уравнение (4.2) определяют условие равновесия системы.

Существенным вопросом, который определяет состояние системы, является степень ее удаления от состояния равновесия. Системы, находящиеся в состоянии равновесия, не меняют своего состояния во времени. Для выведения такой системы из состояния равновесия (т.е. обеспечения условий

для осуществления технологического процесса) необходимо влияние на нее извне путем энергетического воздействия.

При оценке энергоэффективности одним из важнейших вопросов является вопрос о направлении изменения в состоянии системы при внешнем энергетическом воздействии. Исследование этого вопроса опирается на два положения термодинамики: принципа Ле - Шателье и правила фаз Гиббса.

Согласно принципу Ле–Шателье в системе, выведенной из состояния равновесия, происходят изменения, направление сил которых противоположно направлению сил, выводящих систему из равновесия. Применяя принцип Ле–Шателье к конкретным процессам, можно установить, какие параметры нужно изменить, чтобы вызвать необходимые для производства изменения в состоянии системы.

Правило фаз Гиббса устанавливает зависимость между числом компонентов системы K , числом фаз Φ и числом степени свободы S :

$$S = K - \Phi + 2. \quad (4.3)$$

Фаза — определенное количество вещества, физически однородное во всей массе. Система может состоять из одной или нескольких фаз.

Компонент — чистые химические соединения, из которых: состоят фазы и которые могут переходить из одной фазы в другую.

Состояние системы определяется совокупностью ее интенсивных свойств – параметров, в качестве которых приняты давление, температура, концентрация, удельный объем.

Число независимых параметров, которое может быть выбрано произвольно и определяет значение остальных параметров, называется числом степеней свободы.

Пример применения принципа Ле - Шателье

Имеется закрытый сосуд с поршнем в верхней части. В сосуд наливается вода, над поверхностью которой под поршнем находится пар. При опускании поршня в сосуде создается давление. Согласно принципу Ле - Шателье при соблюдении изотермических

условий в рассматриваемой системе должен начаться противодействующий процесс. Этим процессом будет конденсация пара, что и наблюдается в действительности.

Пример применения правила фаз Гиббса

Однокомпонентная равновесная система, например, может состоять из одной, двух или трех фаз, находящихся в равновесии. В соответствии с правилом фаз в первом случае $S = 1 - 1 + 2 = 2$. Если в объеме имеются только пары воды, то температура и давление могут меняться в довольно значительных пределах без того, чтобы возникала новая фаза (жидкость или лед). Для двух фаз из уравнения следует, что $S = 1 - 2 + 2 = 1$. Это значит, что если в замкнутой системе в равновесии находятся вода и водяной пар, то давление и температура связаны между собой строгой зависимостью, т. е. каждой температуре будет соответствовать строго определенное давление. Если же попытаться при данной температуре повысить давление, то это приведет к испарению воды, и до тех пор, пока вся вода не испарится, давление поднять не удастся. Если же попытаться понизить давление, то пар будет конденсироваться, и только после исчезновения паровой фазы удастся получить равновесную систему при новом давлении. Таким образом, для двухфазной однокомпонентной системы можно произвольно выбрать только один параметр —давление или температуру. Наконец, три фазы — лед, вода и водяной пар — могут существовать лишь при единственном значении температуры и давления ($S = 1 - 3 + 2 = 0$), т. е. система не имеет ни одной степени свободы.

4.2. ДВИЖУЩАЯ СИЛА ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Понятие «движущая сила» является основным при рассмотрении любого процесса. Она представляет собой некоторую разницу потенциалов, характерную для каждого вида процессов. Причиной переноса массы или энергии является наличие в системе неравновесия. Подобно электрическому полю, образуемому вокруг точечного заряда, точечный источник теплоты образует тепловое температурное поле. Нестационарное и стационарное тепловое температурное поле описываются функциональными зависимостями:

$$T = f(X, Y, Z, \tau), \quad (4.4)$$

$$T = f(X, Y, Z), \quad (4.5)$$

где X, Y, Z, τ - пространственные и временные координаты.

Каждая точка электрического поля характеризуется своим потенциалом. Электрический ток возникает между точками поля, если потенциалы в них различны. Т.о. движущая сила процесса есть разность потенциалов в двух точках пространства. Если соединить все точки двухмерного поля с одинаковой температурой, то образуются изотермические кривые. Мерой интенсивности изменения температуры является отношение $\Delta T / \Delta l$, где ΔT — изменение температуры, отвечающее перемещению на весьма малом отрезке l . Наиболее существенным является интенсивность изменения температуры в направлении нормали n , которое в пределе носит название градиента температуры:

$$\lim(\Delta T / \Delta n)_{\Delta n \rightarrow 0} = (\partial T / \partial n) \bar{n} = \text{grad } \bar{T}, \quad (4.6)$$

Градиент температур является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры.

Понятие «градиент» является универсальным для характеристики движущей силы технологического процесса.

Так, движущую силу процессов массопереноса можно представить в виде градиента концентраций:

$$\lim(\Delta C / \Delta n)_{\Delta n \rightarrow 0} = (\partial C / \partial n) \bar{n} = \text{grad } \bar{C} \quad (4.7)$$

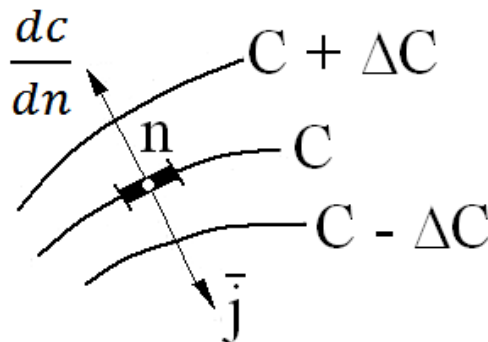


Рис.4.1. К определению движущей силы

Градиент концентраций является вектором, направленным по нормали к изоконцентрационной поверхности в сторону возрастания концентраций. Вещество самопроизвольно переходит только в сторону убывания концентрации. Количество вещества G , переносимого через какуюлибо изоконцентрационную поверхность в единицу времени, называется потоком вещества. Поток вещества, отнесенный к единице площади изоконцентрической поверхности, называется плотностью потока вещества \bar{j} , которая является вектором, направленным по нормали к изоконцентрационной поверхности в сторону убывания концентрации. Таким образом, \bar{j} и \overline{grad} лежат на одной прямой, но направлены в противоположные стороны.

4.3. НАПРАВЛЕНИЕ ПРОТЕКАНИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Распределяемое вещество всегда переходит из фазы, где его содержание выше равновесного, в фазу, в которой концентрация этого вещества ниже равновесной. Направление переноса распределяемого вещества, т. е. направление массопередачи, можно определить с помощью линии равновесия и рабочей линии (рис.4.2.).

Рабочая линия представляет собой прямую, которая наклонена к горизонту под углом, тангенс которого равен A , и отсекает на оси ординат отрезок, равный B . Рабочая линия для всего аппарата ограничена точками с координатами x_{II} и y_k (верхний конец аппарата) и y_n и x_k (нижний конец аппарата).

Пусть массопередача происходит между фазами Φ_x и Φ_y , рабочие концентрации которых равны x и y соответственно.

Если рабочая линия расположена ниже линии равновесия (рис. 4.2., а), то для любой точки, например точки A рабочей линии, $y < y^*$ и $x > x^*$, где y^* и x^* — равновесные концентрации. Следовательно, распределяемое вещество

(компонент) будет переходить в этом случае из фазы Φ_x в фазу Φ_y . Перенос в таком направлении происходит, например, в процессе ректификации, где более летучий компонент переходит из жидкой фазы (Φ_x) в паровую (Φ_y) (см. главу 4). Если же рабочая линия расположена выше линии равновесия (рис. 4.2., б), то для произвольно выбранной на рабочей линии точки А концентрация $y > y^*$ и $x < x^*$. При этом распределяемый компонент будет переходить из фазы Φ_y в фазу Φ_x .

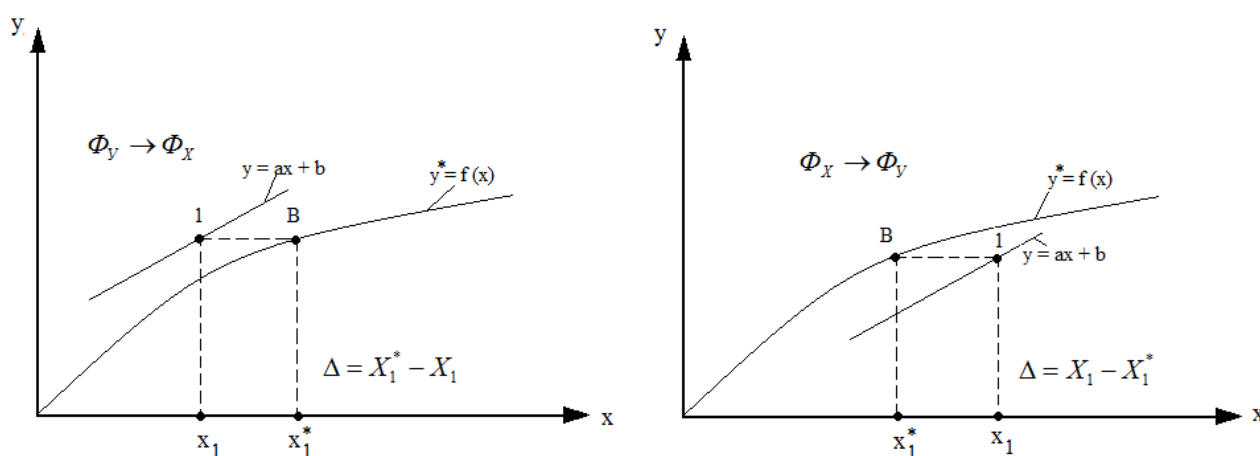


Рис. 4.2. Определение направления массопередачи по Y — X-диаграмме:
а — рабочая линия ниже линии равновесия; б — рабочая линия выше линии равновесия.

В качестве примера такого направления массопередачи можно указать на направление переноса в процессе абсорбции, где распределяемый компонент (поглощаемый газ) переходит из газовой фазы в жидкую.

Величину движущей силы и направление протекания процесса устанавливают по взаимному положению равновесной и рабочей линий. Движущая сила является одним из основных факторов, определяющих энергоэффективность процесса массопередачи.

4.4. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА СУБСТАНЦИЙ

При анализе энергоэффективности ЭТО и выявлении основных факторов, влияющих на энергоемкость продукции особое значение имеет знание кинетических закономерностей процессов, протекающих в ЭТО, т.е. зависимостей, связывающих скорости протекания процессов с движущими силами.

Единство кинетических закономерностей групп основных процессов позволяет сформулировать общий закон, описывающий процессы массоэнергопереноса:

$$\frac{dU}{Fd\tau} = \frac{\Delta}{R} = K\Delta \quad (4.8)$$

Скорость процесса переноса пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению переноса.

В уравнении (4.2) приняты следующие обозначения: U – количество массы или энергии; F – площадь, через которую проходит масса или энергия; τ – продолжительность процесса; Δ – движущая сила процесса; R – сопротивление массо – или энергопереносу; K – коэффициент скорости протекания процесса
($K = 1/R$).

Для переноса теплоты уравнение (4.8) запишется:

$$\frac{dQ}{Fd\tau} = \frac{\Delta t}{R_1} = K_1 \Delta t, \quad (4.9)$$

где Q – количество переданной теплоты, кДж; F – поверхность теплообмена, м²; t – время, с; Δt – движущая сила процесса теплопередачи, °С; $R_1 = 1/K_1$ – термическое сопротивление; K_1 – коэффициент скорости процесса (для случая теплоотдачи – это коэффициент теплоотдачи α ; для теплопередачи – это коэффициент теплопередачи K).

Для движения жидкости или газа через слой зернистого материала:

$$\frac{dV}{fd\tau} = \frac{\Delta p}{R_2} = K_2 \Delta p, \quad (4.10)$$

где V – объем протекающей жидкости м^3 ; f – площадь поперечного сечения слоя, м^2 ; $R_2 = 1/K_2$ – гидравлическое сопротивление слоя; K_2 – коэффициент скорости; Δp – движущая сила процесса, Н/м^2 .

Для случая переноса вещества в диффузионном процессе

$$\frac{dM}{Fd\tau} = \frac{\Delta c}{R_3} = K_3 \Delta c, \quad (4.11)$$

где M – масса вещества, переносимого из одной фазы в другую, кг ; F – поверхность контакта фаз, м^2 ; Δc – движущая сила процесса; $R_3 = 1/K_3$ – диффузионное сопротивление; K_3 – коэффициент скорости процесса (для случая массоотдачи – это коэффициент массоотдачи β).

Зависимость (4.8) описывает и закономерности переноса электрических зарядов (закон Ома $I = U/R$, где U – разность потенциалов, R – сопротивление, I – сила тока), что является следствием единства законов переноса в материальном мире.

Все приведенные выше уравнения изоморфны, т.е. имеют одинаковую по форме математическую запись.

Из уравнения (4.8) вытекает и основной принцип интенсификации процессов переноса: увеличение движущей силы и снижение сопротивления переносу.

Глава 5. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ В ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ АПК

5.1. КОНЦЕПЦИЯ ОЦЕНКИ ТОПЛИВНО – ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА АПК. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общие сведения и постановка задачи.

Значительные затраты топлива при производстве продукции относительно других видов энергии существенно отличают энергетику предприятия АПК от энергетики промышленного предприятия. Закон РФ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности» не вносит различия между топливом и видами энергии. В настоящей концепции рассматривается расход топлива на энергетическое обеспечение силовых мобильных и транспортных процессов.

Производство в АПК имеет, как правило, две составляющие:

- Стационарное производство – ограничено объемом здания, потребляет, как правило, энергию централизованных источников (электроэнергия, тепло), автономных (дизельгенераторы, котельные, использующие жидкие и твердые топлива) и вторичных энергетических ресурсов (ВЭР), в виде тепла.
- Мобильное производство – масштабы определяются, в основном, площадями обрабатываемых земель, основным используемый источник энергии - жидкое топливо.

В пределах земельной площади предприятий АПК существуют, как правило, ресурсы возобновляющихся источников энергии (ВИЭ):

- биоэнергии, которая может быть преобразована в газ или жидкое топливо с попутным получением удобрений;

- ветровой энергии с возможным преобразованием в механическую или электрическую;
- энергии водных потоков с возможным преобразованием в электрическую.
- солнечной энергии, преобразуемой в электрическую и тепловую.

Однако, эти источники не только не используются, но и не определяется их ресурс, несмотря на то, что сельскохозяйственное производство наиболее подходящий потребитель.

Задача энергосбережения (повышения энергоэффективности производства) – уменьшение энергоемкости продукции (отнюдь не уменьшение потребления энергии). Выполнение задачи в такой формулировке должно рассматриваться как удовлетворение требований рыночных отношений, поскольку энергоемкость определяет конкурентоспособность продукции. Следовательно, успешная работа агроинженера в направлении энергоэффективности выводит его производственные функции за рамки ответственности только за техническую составляющую и приближает к управлению экономической составляющей (к менеджменту). Одновременно с повышением энергоэффективности в АПК должны решаться задачи повышения энерговооруженности труда и энергообеспеченности социально-бытового комфорта сельского населения, снижающих миграцию. Поэтому общим результатом рационализации сельской энергетики должно стать увеличение потребления энергии при максимальной эффективности ее производственного использования.

5.2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ И ОКАЗАНИЯ УСЛУГ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

5.2.1. СТРУКТУРА И СМЫСЛОВОЕ НАПОЛНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Методика включает следующие составные элементы с их наполнением конкретными положениями при каждом отдельном применении:

- идентификация назначения (с целью обеспечения энергосбережения с учетом обязательных мер по охране окружающей среды);
- выбор методов (аналитический, инструментальный, расчетный, экспертный, аудиторский);
- определение основных технических средств технологической энергетической системы (номенклатура основного технологического оборудования) и средств измерений;
- определение вспомогательных технических средств технологической энергетической системы (номенклатура вспомогательного оборудования и оснастки);
- установление требований к квалификации кадров (обученность основам инструментального, организационно-технического и нормативно-методического обеспечения энергосбережения во взаимосвязи четырех обязательных аспектов деятельности: производственной, экологической, социальной и ресурсосберегающей);
- установление последовательности и оценка весомости операций (процедур) выполнения работы по оценке и обеспечению технологической энергоемкости производимой продукции и оказываемых услуг;
- выбор конкретного алгоритма получения (в т. ч. вычисления) результатов

- оценки технологической энергоемкости (на основе общего алгоритма, установленного в настоящем стандарте);
- определение порядка документирования (оформления) результатов оценки технологической энергоемкости производимой продукции и оказываемых услуг;
 - решение проблемы метрологического обеспечения (с учетом возможных, имеющих место потерь энергоресурсов в технологических процессах изготовления, хранения, транспортирования, потребления оцениваемой продукции и ее ликвидации после использования по назначению);
 - оценка эколого-технологической и социально-экономической эффективности (применительно к конкретному технологическому процессу производства продукции, исполнения услуги).

При планировании и обеспечении снижения энергоемкости технологических процессов необходимо учитывать и устранять возможные потери ТЭР.



Рис. 5.1 Структурирование термина «Требования общества» (согласно ИСО 8402) внутри ядра информационно-графической модели стандартософии «ОКО ЗЕМНОЕ»

5.2.2. ХАРАКТЕР ВОЗМОЖНЫХ ЭНЕРГОПОТЕРЬ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ СНИЖЕНИЯ НА СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ПРОДУКЦИИ И ИСПОЛНЕНИЯ УСЛУГИ

Потери энергетических ресурсов с увеличением технологической энергоемкости продукции и услуг возможны, как правило, по ряду следующих причин:

- неправильное применение и/или недогрузка основного технологического оборудования;
- нарушение персоналом технологических регламентов производства продукции, оказания услуг и другие бесхозяйственные потери;
- несоответствие среды внутри производственных помещений установленным технологическим требованиям по нормальным климатическим условиям функционирования основного оборудования;
- несоблюдение требований по сертификации качества электрической энергии на соответствие ГОСТ 13109;
- методические погрешности расчетов энергобалансов в соответствии с ГОСТ 27322;
- нарушение требований нормативных документов по охране окружающей среды;
- нарушение требований нормативных документов по обеспечению единства измерений и проведения испытаний согласно ПР 50.2.009;
- неквалифицированное документирование результатов оценки технологической энергоемкости;
- неиспользование или недоиспользование вторичных энергетических ресурсов.

Неправильное применение и/или недогрузка основного технологического оборудования приводят к потерям в технологических процессах, в особенности при производстве электроэнергии заданного качества.

Для уменьшения потерь ТЭР в технологическом цикле необходимо подавать их потребителям в строгом соответствии с действительными, а не расчетными нагрузками, что зависит от обученности (компетентности) и добросовестности обслуживающего персонала. Для уменьшения бесхозяйственности необходимо снижать потери ТЭР, скрываемые в допускаемом небалансе (погрешности) учета. Эта погрешность должна быть четко установлена и подтверждена Государственным метрологическим органом в установленном порядке, т. е. бухгалтерские программы расчетов суммарной стоимости объема выпуска электроэнергии должны быть аттестованы в соответствии с ГОСТ Р 8.563 с учетом условий измерений в соответствии с ГОСТ 8.395.

К потерям от несоответствия среды внутри производственных помещений установленным технологическим требованиям по нормальным климатическим условиям функционирования основного оборудования относятся перегрузки оборудования и рост технологической энергоемкости. Особое внимание должно быть уделено соблюдению требований к качеству электрической энергии (ГОСТ 13109) применительно к конкретным технологическим энергетическим системам, что должно подтверждаться сертификационными испытаниями.

Потери при расчетах энергобаланса ведут к снижению получения возможной эффективности использования энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники, технологий и соблюдении требований к охране окружающей техногенной среды потребителем ТЭР (индивидуальным пользователем или юридическим лицом).

К потерям от нарушения требований нормативных документов по охране окружающей среды относятся штрафные санкции за превышение значений предельно допустимых выбросов и сбросов, предельного количества отходов, находящихся на территории предприятия, что установлено в действующих

природоохранных нормативных документах и документах Госкомсанэпиднадзора России.

К потерям от нарушений метрологического характера относятся отсутствие на входе и выходе технологических энергетических систем счетчиков ТЭР, а также превышение погрешностей от заданных в технической документации у имеющихся средств измерений, в т. ч. счетчиков электрической, тепловой энергии (в т. ч. горячей воды).

К потерям из-за методических погрешностей расчетов относятся ошибки в определении:

- норм выработки, потребления электроэнергии, тепловой энергии, топлива для производства продукции и оказания услуг;
- норм потерь в технологии производства электроэнергии, тепловой энергии, топлива для производства продукции и оказания услуг;
- назначенных и измеренных общих объемов использования электроэнергии, тепловой энергии, топлива для производства продукции и оказания услуг.

Для снижения потерь ТЭР и финансовых ресурсов необходимо следить, чтобы ошибки расчетов норм выработки и технологических потерь ТЭР были равны точности инженерных расчетов и не превышали суммарно 5 %.

К потерям от неквалифицированного документирования результатов оценки энергоемкости относится недоучет расхода электроэнергии для собственных нужд ТЭЦ, поскольку их показания вычитаются из общего объема выпуска электроэнергии при вычислении общего коммерческого отпуска электроэнергии ТЭЦ потребителям через цепи передачи.

Потери от неиспользования или недоиспользования вторичных энергетических ресурсов, которые можно получить с применением современных высоких технологий, например из 1 т мусора, составляют:

- 620 кг топлива, по калорийности соответствующего 300 л мазута;
- 50 кг строительных материалов (песка, щебня, камня, измельченного

стекла и др.);

- 20 кг цветных и черных металлов, с использованием которых энергоемкость вторичной продукции из них значительно снижается;
- 65 кг пластмасс;
- 100 кг макулатуры (без 20 % которой в США запрещен выпуск бумаги);
- 5 кг химических солей, используемых в промышленности и лабораториях.

5.2.3. ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ (ОЦЕНКИ) ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ И ИСПОЛНЕНИЯ УСЛУГ

Обобщенный алгоритм получения результатов оценки технологической энергоемкости в конкретных условиях производства продукции и исполнения услуг включает следующие процедуры:

1) определяют (качественно и в процентах) структуру энергозатрат по каждому виду выпускаемой продукции и исполняемой услуги, учитывая, в частности:

- прямые затраты в основном производстве по видам ТЭР,
- косвенные энергозатраты, включая вспомогательное производство,
- долю энергозатрат ТЭС в общезаводских расходах,
- долю затрат ТЭС в общецеховых расходах,
- отчисления на амортизацию,
- отчисления на текущий ремонт и обслуживание оборудования,
- энергозатраты на транспортирование веществ, материалов, комплектующих изделий, составных частей при изготовлении продукции, оказании услуг,
- энергозатраты на создание нормальных условий работы в производственных помещениях (освещение, отопление, обеспечение горячей водой, транспортом и другими необходимыми жизненными услугами),

– природоохранные затраты;

2) замеры и/или соответствующее выявление (на основе анализа документации) энергозатрат с последующим определением фактической технологической энергоемкости для конкретного вида продукции и услуг производят службы главного технолога с участием лабораторий и энергослужб:

- в течение суток,
- ежемесячно,
- поквартально,
- в течение года,

сравнивая и усредняя (суммируя при экспертных оценках) результаты с обоснованием и документированием их;

3) переводят все размерные характеристики энергозатрат в условное топливо;

4) технологическую энергоемкость вычисляют по отдельности для продукции, услуги каждого вида, используя, например, расчетные формулы, учитывающие ресурсозатраты (на вещества, материалы, комплектующие), энергозатраты (в т. ч. на транспортирование и хранение продукции), трудозатраты различного рода;

5) оценивают существенность влияния энергетической нагрузки технологической энергетической системы на окружающую объект среду и, только если окажется необходимо, при определении энергоемкости учитывают затраты на мероприятия по охране окружающей среды (экозатраты).

6) технологическую энергоемкость продукции, услуги ($\mathcal{E}_{\text{пр,у}}$) определяют в общем виде по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{пр,у}} = \frac{\text{Энергозатраты на доставку исходных ресурсов} + \text{Энергозатраты на техпроцесс} + \text{Энергозатраты на персонал} + \text{Энергозатраты на экологию}}{\text{Общая стоимость выпущенной продукции (стоимость оказанных услуг)}}; \quad (5.1)$$

7) показатель технологической энергоемкости продукции и услуги может иметь различные размерности, в общем случае принимая вид:

- энергозатраты (ГДж, МДж, кДж)/натуральные единицы по видам продукции, услуг, в частности: МДж/(кВт·ч) и/или МДж/ккал (для ТЭР), МДж/кг,
- МДж/т, МДж/1000 единиц, (МДж/м², МДж/м³, МДж/тыс. руб. (для продукции, услуг), МДж/чел-ч, чел-ч/н.е (для услуг).

Для учета потребления всех видов ТЭР необходимо проводить перерасчет, ориентируясь на условное топливо. Под условным топливом понимают топливо с теплотой сгорания 29300 кДж/кг.

Перерасчет натурального топлива на условное проводят по формуле

$$B_y = B_n \cdot Q_n / 29300. \quad (5.2)$$

где B_y — количество условного топлива, кг; B_n — количество натурального топлива, кг; Q_n — средняя теплота сгорания натурального топлива, кДж/кг.

Пересчет электрической, тепловой энергии и топлива на условное топливо должен производиться по их физическим (энергетическим) характеристикам на основании следующих соотношений:

1 кг у.т. = 29,30 МДж = 7000 ккал;

1 кВт·ч = 3,6 МДж = 0,12 кг у.т.;

1 кг дизельного топлива равен 1,45 кг у.т.

1 кг автомобильного бензина равен 1,52 кг у.т.;

1 ккал = 427 кг·м = 4,19 кДж = 1,163 Вт·ч;

1 л.с.ч = 2,65 МДж; 1 МДж = 0,278 кВт·ч.

При определении расхода автомобильного бензина (1 л на 100 км пробега) на транспортирование грузов линейные нормы увеличивают:

- при работе в зимнее время в южных районах — до 5 %;
- при работе в зимнее время в северных районах — до 15 %;
- при работе в горных условиях — от 5 % до 20 %;
- на дорогах со сложным планом — до 10 %;
- в черте города — до 10 %;

- при перевозке грузов, требующих пониженной скорости, — до 10 %;
- при почасовой работе — до 10 %;
- при работе в карьерах, движении по полю — до 20 %.

Для определения технологической энергоемкости продукции и услуг используют аналитические выражения (5.3 - 5.8) (I вариант);

1) полную энергоемкость продукции или услуг ($\mathcal{E}_{\text{пр,у}}$) в мегаджоулях на натуральные единицы (МДж/н.е.) измерения (шт., тыс. руб., часов и др.) определяют по формуле)

$$\mathcal{E}_{\text{пр,у}} = \mathcal{E}_{\text{е}} + \mathcal{E}_{\text{м}} + \mathcal{E}_{\text{ф}} + \mathcal{E}_{\text{р}} + \mathcal{E}_{\text{о}}, \quad (5.3)$$

где $\mathcal{E}_{\text{е}}$ — полная энергоемкость ТЭР, необходимых для производства продукции, исполнения услуг; $\mathcal{E}_{\text{м}}$ — полная энергоемкость исходных сырья, веществ, материалов, комплектующих изделий, необходимых для производства продукции, исполнения услуг; $\mathcal{E}_{\text{ф}}$ — полная энергоемкость основных производственных фондов (ОПФ), амортизированных при производстве продукции, исполнении услуг; $\mathcal{E}_{\text{р}}$ — полная энергоемкость воспроизводства рабочей силы при производстве продукции, исполнении услуг; $\mathcal{E}_{\text{о}}$ — полная энергоемкость мер по охране окружающей среды при производстве продукции, исполнении услуг.

2) $\mathcal{E}_{\text{е}}$ определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{е}} = \mathcal{E}_{\text{н}} + \mathcal{E}_{\text{у}} + \mathcal{E}_{\text{г}} + \mathcal{E}_{\text{и}}, \quad (5.4)$$

где $\mathcal{E}_{\text{н}}$ — полная энергоемкость ТЭР, расходуемых непосредственно при производстве продукции, исполнении услуг; $\mathcal{E}_{\text{у}}$ — полная энергоемкость ТЭР, расходуемых при транспортировании исходных сырья, веществ, материалов, комплектующих изделий; $\mathcal{E}_{\text{г}}$ — снижение полной энергоемкости продукции и услуг за счет использования образованных при производстве продукции и исполнении услуг горючих отходов, сбросов и выбросов; $\mathcal{E}_{\text{и}}$ — приращение полной энергоемкости, обусловленное импортом ТЭР (если он имеет место).

3) $\mathcal{E}_{\text{м}}$ определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{м}} = \mathcal{E}_{\text{мо}} + \mathcal{E}_{\text{ми}} + \mathcal{E}_{\text{н}}, \quad (5.5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{мо}}$ — полная энергоемкость отечественных исходных сырья, веществ, материалов, комплектующих изделий, необходимых для производства одного изделия, исполнения одной услуги; $\mathcal{E}_{\text{ми}}$ — полная энергоемкость импортируемых исходных сырья, веществ, материалов, комплектующих изделий, необходимых для производства единицы продукции, исполнения одной услуги; $\mathcal{E}_{\text{н}}$ — снижение полной энергоемкости продукции и услуг за счет использования образованных при производстве единицы продукции и исполнении одной услуги горючих отходов, сбросов и выбросов.

4) $\mathcal{E}_{\text{ф}}$ определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ф}} = \sum_{i=1} a_{\text{фи}} \cdot \mathcal{E}_{\text{фи}}, \quad (5.6)$$

где i — индекс вида ОПФ; $a_{\text{фи}}$ — объем i -го вида ОПФ, амортизированных при производстве продукции, оказании услуг (в размерности натуральные единицы ОПФ/н.е. для продукции или услуги); $\mathcal{E}_{\text{фи}}$ — полная энергоемкость ОПФ i -го вида (МДж/н.е. для продукции или услуги).

5) $\mathcal{E}_{\text{р}}$ определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{р}} = a_{\text{з}} \cdot \mathcal{E}_{\text{з}}, \quad (5.7)$$

где $a_{\text{з}}$ — удельные трудозатраты на производство продукции или оказание услуги, с учетом оплаты труда в отрасли, чел-ч/н.е. для продукции или услуги; $\mathcal{E}_{\text{з}}$ — полная энергоемкость трудозатрат, МДж/н.е. для продукции или услуги.

6) $\mathcal{E}_{\text{о}}$ определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{о}} = \sum_{i=1} a_{\text{ои}} \cdot \mathcal{E}_{\text{ои}}, \quad (5.8)$$

где $a_{\text{ои}}$ — коэффициент образования невозвратных (в данное производство) или удаляемых опасных отходов i -го вида, т/н.е. для продукции ;или услуги; $\mathcal{E}_{\text{ои}}$ — полная энергоемкость устранения последствий отрицательного воздействия на окружающую среду 1 т невозвратных (в данное производство) или удаляемых опасных отходов i -го вида, МДж/т.

При определении технологической энергоемкости пищевой, сельскохозяйственной продукции, строительных конструкций, зданий и

сооружений, транспортных и других услуг целесообразно использовать формулы с учетом энергетических эквивалентов (II вариант определения, стандартизуемый в отраслевых документах).

Значения энергетических эквивалентов для ТЭР и некоторых видов металлов, материалов, сооружений, транспортных средств, а также затрат живого труда для некоторых категорий работ приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Энергетические эквиваленты

Наименование объекта	Энергетический эквивалент	Энергосодержание ТЭР, Дж/кг
Топливо-энергетические ресурсы (МДж/кг)		
Топливо:		
- дизельное	10,0	42,7
- бензин авиационный	10,5	44,4
- бензин автомобильный	10,5	43,9
- керосин тракторный	10,0	43,9
- биогаз	—	36,2
Электроэнергия	8,7 МДж/(кВт·ч)	—
Тепловая энергия	0,0055 МДж/ккал	—
Продукция (МДж/кг)		
Тракторы, самолеты, вертолеты	120	—
Сельскохозяйственные машины, сцепки	104	—
Продукция машиностроения	144	—
Кирпич	8,5	—
Материалы (МДж/кг)		
Сталь (прокат)	45,5	—
Алюминий (из глинозема)	343	—
Медь	83,7	—
Цемент	7,0	—
Известковые материалы	3,8	—
Конструкции и сооружения (МДж/м²)		
Бетонные конструкции	8,3	—
Здания и сооружения (жилые)	4810	—
Производственные здания	5025	—
Административные и культурно-бытовые здания	5662	—
Подсобные помещения	4180	—
Ограждения	383	—
Овощные продукты растениеводства (МДж/кг)		
Картофель	8,0	—
Подсолнечник	5,0	—
Кукурузное зерно	5,0	—

Окончание табл.5.1.

Пшеница	6,8	—
Сахарная свекла	18,4	—
Затраты живого труда (МДж/(чел-ч) по категориям работы		
Очень легкая	0,60	—
Легкая	0,90	—
Средняя	1,26	—
Тяжелая	1,86	—
Очень тяжелая	2,50	—

5.2.4. ФОРМЫ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТОВ

При документировании (оформлении) расчетов полной (технологической) энергоемкости продукции и услуг данные сводят в таблицы.

Таблица 5.2.

Форма документирования исходных данных и результатов

Вид ТЭР, других ресурсов и показателей энергосбережения	Единицы измерения, натуральные единицы (н.е)	Затраты ресурса, н.е./т.е.	Полная энергоемкость ресурса, МДж/н.е.	Полная энергоемкость продукции, МДж/т
1	2	3	4	5

В графе 1 указывают названия видов ресурсов, работ, затрат, которые определяют энергозатраты на производство продукции и исполнение услуг, а также соответствующих показателей энергосбережения.

В графе 2 указывают абсолютные или удельные (на единицу данного вида продукции или услуги) значения расхода названного ресурса.

В графе 4 указывают соответствующую величину составляющей полных энергозатрат (при заполнении графы 3 абсолютными значениями расхода ресурса) или полной энергоемкости (при заполнении графы 3 удельными значениями расхода ресурса), обусловленной затратами названного ресурса.

Величину полных энергозатрат (в абсолютных единицах) или полной энергоемкости продукции или услуги (в удельных единицах) или полной энергоемкости продукции или услуги (в удельных единицах) определяют как сумму всех составляющих.

Таблица 5.3

Виды ТЭР и показатели энергосбережения

Виды затрат ТЭР, материальных ресурсов, трудозатрат	Единицы измерения, натуральные единицы (н.е.)	Величины энергозатрат, ГДж/тыс. руб.	Структура энергозатрат, %	Примечания
Прямые затраты в основном производстве по видам ТЭР				
Косвенные энергозатраты				
Доля энергозатрат ТЭС в общезаводских расходах				
Доля затрат ТЭС в цеховых расходах				
Природоохранные				
Отчисления на амортизацию				
Отчисления на текущий ремонт, обслуживание оборудования				
Энергозатраты на транспортирование веществ, материалов, комплектующих изделий, составных частей, при изготовлении продукции, оказании услуг				
Энергозатраты на создание нормальных условий работы в производственных помещениях				
Полные энергозатраты, ГДж, ккал	Полная энергоемкость ГДж/т, ГДж/тыс. руб.			

5.3. ИНДЕКСНЫЙ МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЗНАЧИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

При производстве продукции и оказании услуг в условиях, например конкретного цеха переработки продукции, учитывают его прямое или косвенное влияние как технологического энергетического объекта, управляемого людьми, на окружающую среду в виде энергоэкологического индекса ($J_{эос}$).

Общехозяйственные энергозатраты (ОЦЭЗ) для изготовления заданного количества продукции за месяц, квартал, год и исполнения услуги

заопределенный период определяют как сумму расходов энергоресурсов на основные и вспомогательные технологические процессы, тем самым оценивая, во что обходится в энергетическом смысле выполнение, например, месячной производственной программы.

Как правило, имеет место следующий расход ТЭР на общецеховые нужды:

1. технологические процессы (основной и вспомогательные);
2. отопление;
3. освещение;
4. вентиляция (с улавливанием выбросов);
5. кондиционирование;
6. транспортирование готовой продукции;
7. транспортирование, хранение отходов;
8. поддержание пожарной системы;
9. перекачка сточных вод;
10. хранение готовой продукции.

Перечисления 4, 5, 7, 9 относятся к мероприятиям по охране окружающей техногенной среды.

Определяют за выбранный период общецеховые энергозатраты, суммируя энергозатраты по перечислениям 1 — 10:

$$\text{ОЦЭЗ} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_5 + \mathcal{E}_6 + \mathcal{E}_7 + \mathcal{E}_8 + \mathcal{E}_9 + \mathcal{E}_{10}. \quad (5.9)$$

Определяют фактическую долю (в безразмерной «индексной» форме) затрат ТЭР на управление защитой окружающей среды по формуле

$$J_{\text{зос}} = \frac{\text{ОЦЭЗ}}{\mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_5 + \mathcal{E}_7 + \mathcal{E}_8 + \mathcal{E}_9}. \quad (5.10)$$

При планировании программных мероприятий по энергосбережению устанавливают контрольные цифры по оптимизации значения этого индекса.

При оценке значительности и планировании допустимости воздействий энергетической нагрузки на окружающую среду с оценкой необходимости

затрат финансовых средств на плановые или экстренные экологические мероприятия целесообразно использовать следующую эмпирическую зависимость для определения показателя энергетической нагрузки технологического объекта на окружающую среду:

$$ПЭНТО_{oc} = \left(\frac{Z}{J_{эос}} \cdot M(o) / \sum_{y=1}^{M(o)} KO_y \right) \leq 0,7, \quad (5.11)$$

где KO_y — класс опасности для потенциального загрязнителя (y); $M(o)$ — общее количество загрязнителей, потенциально могущих воздействовать на окружающую среду (классы опасности 2; 3; 4) в технологических процессах цеха; Z — общее количество видов продукции, производимых цехом за рассматриваемый период.

Необходимо определить значения $ПЭНТО_{oc}$ за месяц, квартал, год работы анализируемого цеха и только на этой основе принимать окончательное решение о значительности воздействия технологической энергетической системы на окружающую среду за рассматриваемые периоды. Если соблюдается условие (5.11), то энергетическую нагрузку на окружающую среду за рассматриваемый период следует признать допустимой. При этом специальные положения в экологической политике дополнительно не планируют, но действующие нормативные требования необходимо строго соблюдать.

Применительно к принятому критерию (5.11) любое воздействие, выводящее технологическую энергетическую систему за правый предел этого неравенства, должно считаться значительным и приводить к необходимости дополнительных затрат на мероприятия по охране окружающей среды, что должно сказываться на увеличении технологической энергоемкости соответствующих видов выпускаемой продукции и оказываемых услуг.

Использование числа 0,7 в качестве критериального (опорного) при принятии решений в производимых оценках согласуется с международной и зарубежной практикой. Этот критерий непосредственно вытекает также из анализа

«функции желательности» (Харрингтона): при балльной оценке 0,7 имеет место точка перегиба «функции желательности» с необратимым сохранением позитивных изменений при оценивании свойств конкретного объекта.

Для экологических целей и при разработке методики комплексной оценки экологических решений используется тот же критерий.

5.4. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Оценка производится на основе анализа энергетического балансового уравнения, составленного по структурным и параметрическим схемам системного анализа исследуемого сельскохозяйственного объекта. Основной характеристикой каждого исследуемого блока (элемента) в системе является его энергоемкость. Для более глубокого анализа процессов в энергетических блоках с учетом их физической природы может применяться наиболее адекватный в каждом конкретном случае математический аппарат: вектор Умова-Пойнтинга при электроэнергетическом анализе, световой вектор (вектор Гершуна) при фотоэнергетическом анализе, зависимости продуктивности СБО от внешних воздействий при биоэнергетическом анализе и т.д.

Уравнение энергетического баланса:

$$Q_n = Q_k + \Delta Q \big|_{\zeta, \xi} \quad (5.12)$$

где Q_n – энергия на его входе; Q_k – энергия на его выходе; $\Delta Q \big|_{\zeta, \xi}$ – потери энергии; ξ, ζ – обобщенные координаты, в которых описываются изменения составляющих вектора X_j с размерностью m (X_j – набор параметров, численно характеризующих создаваемые условия функционирования СБО

Выражение для энергоемкости в абсолютных единицах:

$$\varepsilon = \frac{Q_n}{Q_k} \big|_{\zeta, \xi} . \quad (5.13)$$

Выражение для энергоемкости в относительных единицах:

$$\varepsilon = k_{\varepsilon} \varepsilon_n, \quad (5.14)$$

где k_{ε} - коэффициент отклонения энергоемкости;

ε_n - номинальное значение энергоемкости.

Критерий оптимизации функционирования ИБЭС

$$\frac{\partial \Pi}{\partial X_j} = 0; \sum_{j=1}^m \frac{\partial \Pi}{\partial X_j} \rightarrow \min, \quad (5.14)$$

где Π - денежное выражение разницы между доходом, получаемым при реализации продукции ИБЭС и затратами на ее получение (прибыль).

Условие оптимизации:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} = 0; \sum_{j=1}^m \frac{\partial \varepsilon}{\partial X_j} \rightarrow \min \quad (5.15)$$

Коэффициент эффективности i -го этапа ЭСМ

$$k_{\varepsilon_{CM_i}} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon'_i}, \quad (5.16)$$

где $k_{\varepsilon_{CM}}$ - коэффициент эффективности внедрения интенсификации ЭТП ε_i - энергоемкость этапа в базовом варианте его проведения;

ε'_i - энергоемкость этапа при проведении интенсификации процесса.

Функциональные зависимости $\varepsilon = f_{\xi}(\xi)$ характеризуют зависимость энергоемкости этапа с параметром ξ от величины параметра ξ .

При анализе задаются начальные, краевые, граничные условия и ограничения, характерные для функционирования СБО в рамках ИБЭС.

Значение энергоемкости n последовательно соединенных энергетических блоков в системе подчиняется мультипликативному закону

$$\varepsilon = \prod_{i=1}^n \varepsilon_i \quad (5.17)$$

При параллельном соединении n энергетических блоков (с долей потребляемой энергии α_i каждым), выполняется аддитивный закон для обратных величин

$$\frac{I}{\varepsilon} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\varepsilon_i}. \quad (5.18)$$

Коэффициент общей эффективности из n объектов вычисляется по мультипликативному закону

$$k_{\varepsilon CM} = \prod_{i=1}^n k_{\varepsilon CM_i} \quad (5.19)$$

Обоснование режима ЭТП производится по функциональным зависимостям $\varepsilon = f_{\xi}(\zeta)$, путем проведения соответствующих организационно-технических мероприятий.

Энергосберегающий алгоритм управления ЭТП формируется по критерию поддержания минимального значения энергоемкости в объектах системы в любой момент времени, по результатам постоянного мониторинга параметров ЭТП.

Представленная методика имеет практическую значимость и позволяет формулировать рекомендации по повышению энергоэффективности работы сельскохозяйственного производства.

5.5. ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВАХ АПК

5.5.1. ПУТИ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ РЕКТИФИКАЦИИ

Ректификация является одним из энергоемких процессов. При проектировании ректификационных установок необходимо использовать все возможные пути экономии энергии. К ним относятся:

1. Обеспечение минимальных потерь тепла в окружающую среду путем тщательной термоизоляции ректификационных колонн. При этом затраты на изоляцию должны компенсироваться стоимостью сэкономленного тепла.

2. Расходы греющего пара и охлаждающей воды возрастают с увеличением коэффициента избытка флегмы σ и достигают наименьших значений при минимальном флегмовом числе R_{\min} , т. е. при $\sigma=1$. Соответственно увеличиваются затраты. Вследствие уменьшения числа тарелок стоимость колонны с ростом σ или $R = R_{\min} \sigma$ снижается до некоторого значения, а затем возрастает из-за опережающего увеличения диаметра колонны, а также рабочих поверхностей дистилляционного куба и конденсатора. Оптимально в экономическом (в том числе и энергетическом) отношении флегмовое число R_{opt} , соответствующее минимуму суммарных затрат.

3. Значительная экономия греющего пара может быть достигнута в результате использования тепла паров, уходящих из колонны, дистиллята, кубового остатка и конденсата греющего пара (на нагревание исходной смеси и другие производственные нужды).

4. При ректификации гомоазеотропных смесей в двух колоннах при двух разных давлениях пары из колонны с большим давлением могут быть использованы для обогрева колонны низкого давления; при этом отпадает необходимость в конденсаторе первой колонны.

5. Значительную экономию энергии можно достичь с использованием принципа теплового насоса по схеме, изображенной на рис. 5.2, а. Пар, уходящий из колонны 3, сжимается компрессором 1 до давления, соответствующего требуемой температуре его конденсации в нагревательной камере дистилляционного куба. При этом не нужно устанавливать конденсатор; кроме того, сокращаются расходы пара и охлаждающей воды. Рассматриваемая схема выгодна во всех случаях, когда стоимость энергии, потребляемой компрессором, уступает затратам на греющий пар. Экономичность установки

возрастает по мере уменьшения разности температур кипения компонентов ректифируемой смеси.

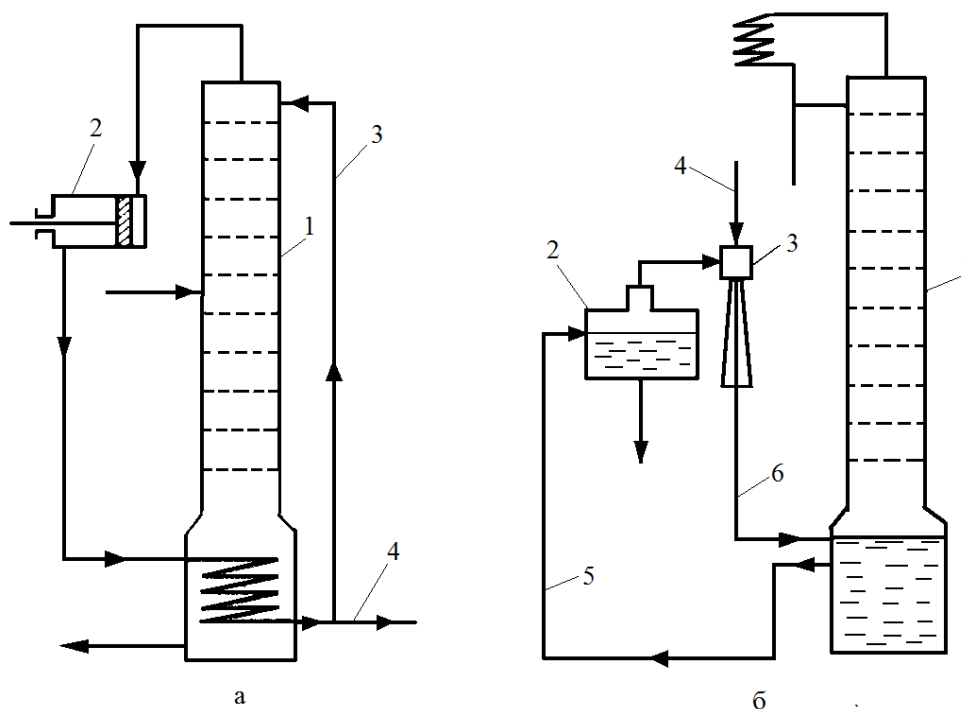


Рис.5.2. Ректификационные установки с тепловым насосом:

а — установка с компрессором для сжатия паров, уходящих из укрепляющей части колонны: 1 — колонна; 2 — компрессор; 3 — флегма; 4 — дистиллят; б — установка с пароструйным инжектором: 1 — колонна; 2 — сосуд-расширитель; 3 — инжектор; 4 — инжектирующий пар; 5 — поток кубового остатка; 6 — смесь сжатых газов

6. В случаях, когда кубовым остатком при ректификации является вода, выгодно обогревать дистилляционный куб голым паром, а не через поверхность нагрева. Помимо удешевления ректификационной установки, в данном случае может быть достигнута значительная экономия тепла путем использования принципа теплового насоса с помощью пароструйного инжектора (рис. 5.2, б). Здесь кубовый остаток переходит из куба в сосуд-расширитель 2, где создается разрежение благодаря присоединению его парового пространства к всасывающему штуцеру пароструйного инжектора 3. Из последнего сжатая смесь инжектирующего пара и вторичных паров, образовавшихся в сосудах-расширителе, подается под нижнюю тарелку испаряющей колонны;

неиспарившаяся и охлажденная часть кубового остатка отводится из системы. Экономия тепла зависит от разности давлений в дистилляционном кубе и сосуде-расширителе и от коэффициента инжекции.

5.5.2. ПУТИ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ КОНЦЕНТРИРОВАНИИ РАСТВОРОВ ВЫПАРИВАНИЕМ

Существует три основных способа экономии энергии:

- многокорпусное выпаривание;
- применение термической компрессии;
- применение механической компрессии.

Использование одного из этих способов позволяет значительно снизить потребление энергии и повысить энергоэффективность ТП. Часто существует возможность сочетать два таких способа для сокращения капитальных и эксплуатационных затрат. В наиболее сложных выпарных установках могут применяться все три способа.

При разработке многокорпусных выпарных установок (МВУ) часто бывает, что имеющийся в распоряжении общий полезный температурный напор на МВУ небольшой, и увеличение числа корпусов МВУ ограничивается невозможностью дальнейшего уменьшения температурных напоров на корпус. Так, для МВУ, применяющихся в производстве концентратов, максимальная температура продукта в первом корпусе испарителя находится в диапазоне 70–75 °С по условиям обеспечения качества концентрата, а минимальная температура в конденсаторе ограничена, как правило, 40 °С применением в качестве хладагента оборотной воды. В подобных случаях для повышения энергетического потенциала вторичных паров может быть применено его сжатие, осуществляемое тем или иным способом (рис. 5.3).

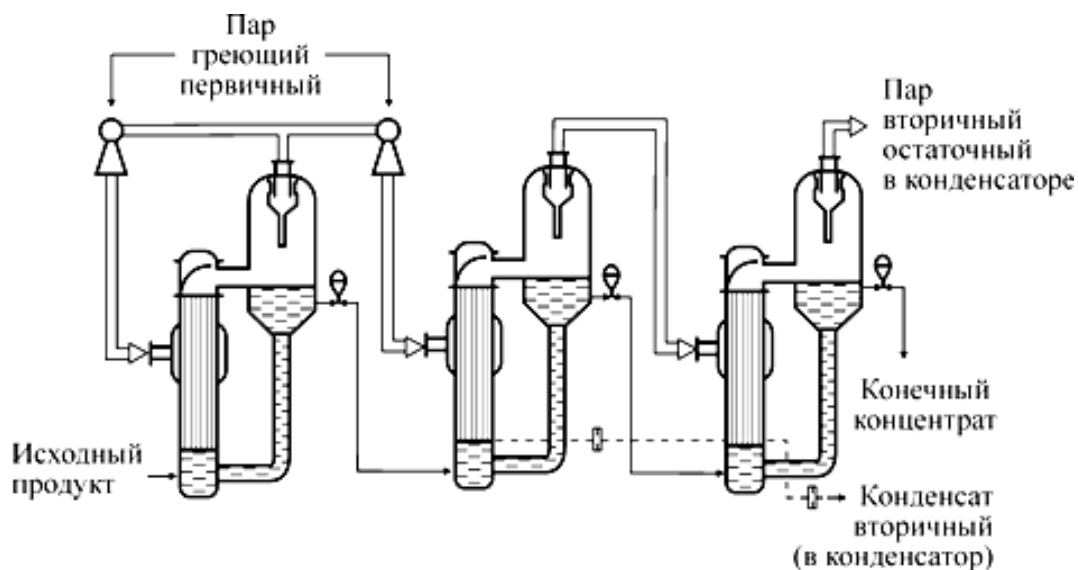


Рис. 5.3. МВУ с пароструйными компрессорами

На практике с целью повышения коэффициента энергетической эффективности выпарных установок применяют сжатие вторичного пара пароструйными компрессорами. Несмотря на то, что компрессоры этого типа имеют низкий (25–30 %) термодинамический КПД, эти устройства нашли широкое применение прежде всего благодаря простоте конструкции, малым габаритам, а следовательно, низкой цене.

В этих аппаратах осуществляется процесс инжекции – передачи кинетической энергии одного потока другому потоку – путем непосредственного смешения. Поток рабочей (активной) среды, обладающий большим давлением покоя, приобретает за счет этого давления в специальном рабочем сопле большую скорость (обычно используются сверхзвуковые сопла Лаваля).

Работа струйных компрессоров характеризуется следующими основными параметрами: степенью сжатия, степенью расширения и коэффициентом инжекции $\beta = G_s / G_0$, т. е. отношением массовых расходов вторичного и основного пара.

На рис. 5.4 показан разрез пароструйного компрессора, который состоит из трёх основных частей: сопло 4, камера всасывания 3, и диффузора 6, 7, 8.

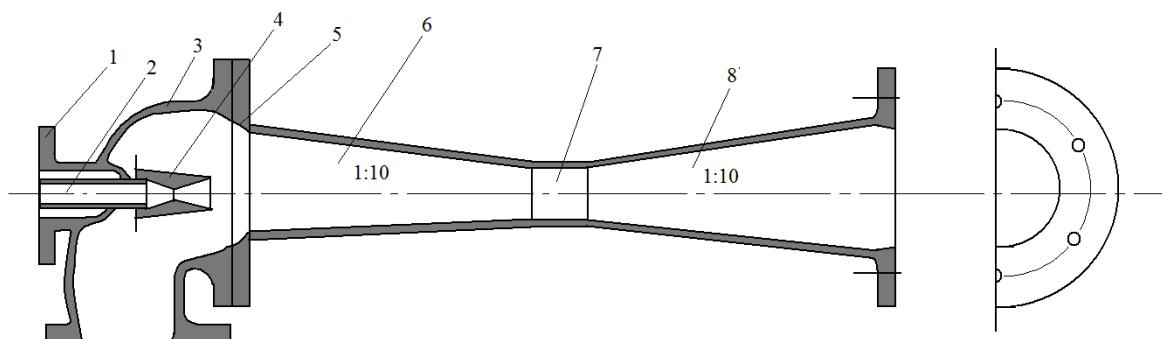


Рис.5.4. Пароструйный компрессор:

1-фланец; 2-соплодержатель; 3-камера всасывания; 4-сопло; 5-фланцы; 6,7,8-диффузор

Входную часть диффузора называют конфузором или камерой смещения. Острый пар с давлением P_0 подводится к соплу 4. Проходя через сопло, пар расширяется, давление его падает, а скорость возрастает до 1000 м/сек и выше. Выходя из сопла с большой скоростью, пар пролетает через камеру всасывания в диффузор, увлекая по пути вторичный пар. В диффузоре скорость пара падает, а давление его возрастает, т.е. компрессор работает на принципе преобразования потенциальной энергии в кинетическую в сопле и наоборот, кинетической в потенциальную в диффузоре.

На рис. 5.5 показан процесс расширения острого пара в сопле и процесс его сжатия в диффузоре в $i-s$ диаграмме. Точка А характеризует начальные параметры острого пара перед соплом. По линии АВ, равной h , происходит адиабатическое расширение пара в сопле с падением давления до давления в камере всасывания. При движении пара в сопле часть кинетической энергии теряется на трение и превращается в тепло, поэтому в действительности расширение пара характеризуется политропической линией АС. В сопле средних размеров превращение кинетической энергии в тепловую составляет

$0,1 h_0$, поэтому, отложив от точки В вверх $0,1 h_0$, получим точку D. Проводя горизонталь из точки D до изобары P_1 получим точку С, параметры пара в которой и соответствуют концу истечения из сопла. К соплу подводится острый пар, но при выходе из сопла параметры его меняются. Правильнее будет острый пар называть рабочим, тогда на всем протяжении струи пар будет соответствовать этому названию.

Вторичный пар подводится в камеру обычно перпендикулярно струе рабочего пара и скорость его незначительна, в то время как скорость рабочего пара на выходе из сопла огромна. Поэтому неизбежен неупругий удар струи рабочего пара о струю вторичного с потерей кинетической энергии и повышения теплосодержания пара. Процесс сжатия начинается не из точки С, а выше по изобаре P_1 из точки М. Линия $MN=h_c$ характеризует адиабатический процесс сжатия пара в диффузоре. В диффузоре также будут потери кинетической энергии на трение с неизбежным повышением теплосодержания пара, и действительный процесс сжатия пойдет по линии MN_1 .

К недостаткам пароструйных компрессоров (кроме низкого термодинамического КПД) можно отнести неизбежное смешивание конденсатов первичного и вторичного пара. В подавляющем большинстве случаев смешанный конденсат имеет состав, не позволяющий возвращать его в теплопункт без прохождения стадии водоподготовки, что повышает стоимость греющего пара. Кроме того, для достижения коэффициентов инжекции, близких к 2, даже в вакуумной МВУ следует располагать паром достаточно высокого давления – свыше 1 МПа.

Струйные компрессоры, применяемые для повышения параметров вторичного пара, по своим свойствам занимают промежуточное значение между пароструйными эжекторами и инжекторами. Они работают в диапазонах степеней сжатия 1,2–2,5 и коэффициентов инжекции 0,7–2. Конструктивно –

это струйные аппараты с цилиндрической камерой смешения, которая может иметь конфузурный участок той или иной длины.

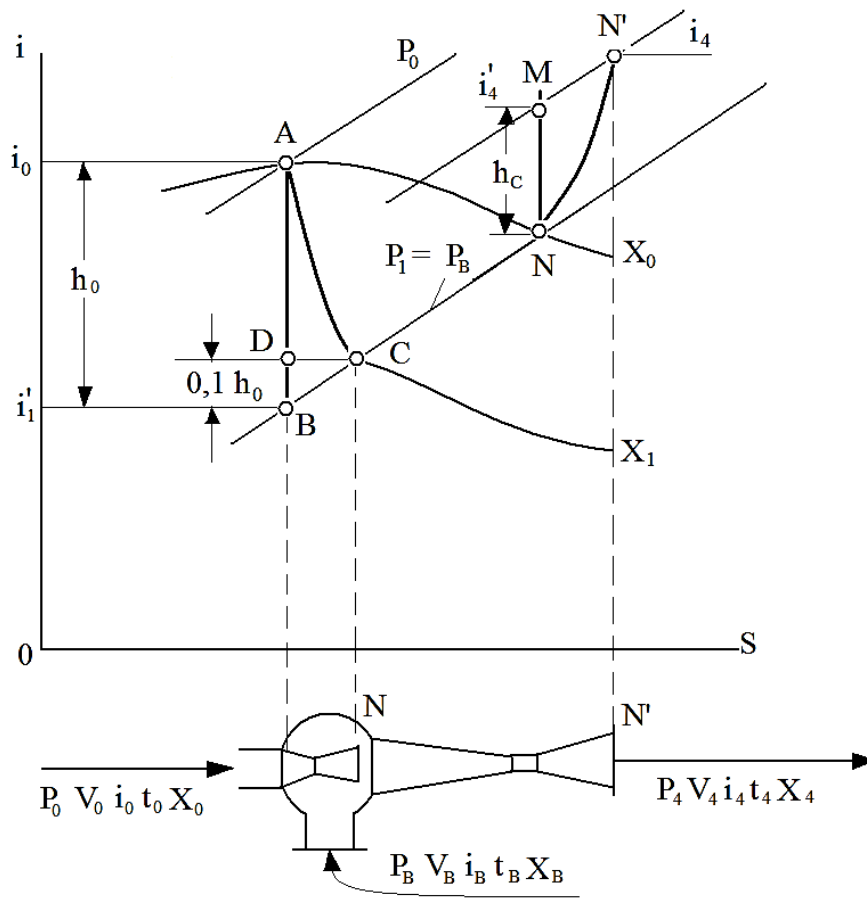


Рис. 5.5. Работа компрессора в $i-s$ диаграмме

Другой способ повышения энергетического потенциала вторичного пара – это его сжатие механическим компрессором какого-либо типа: поршневым, ротационным или, чаще всего, турбокомпрессором. Такие машины достигают достаточно больших термодинамических КПД: 80–85 % при производительности не менее 14 000 м³/мин. Но при меньшей производительности их КПД снижается (не более 75 % для 1000 м³/мин). Высокая эффективность работы механических компрессоров при больших производительностях выпарных установок позволяет применять их даже в сочетании с однокорпусным выпарным аппаратом.

На рис. 5.6 показан однокорпусный роторно-пленочный испаритель в сочетании с механическим компрессором вторичного пара. При работе в установившемся режиме такой аппарат потребляет незначительное количество первичного греющего пара на компенсацию тепловых потерь и отвод тепла с паровым конденсатом. Отбор остаточного вторичного пара осуществляется в еще меньших количествах в основном для обеспечения оперативной регулировки процесса, иногда для отвода избыточного тепла, связанного с перегревом вторичного пара в результате его сжатия в компрессоре, что возможно, например, при выпаривании перегретого продукта. Для пуска такой установки необходимо подать в рубашку испарителя греющий пар в полном объеме (как на выпарном аппарате без компрессии пара) и по мере введения в работу компрессора перейти на обогрев сжатым паром.

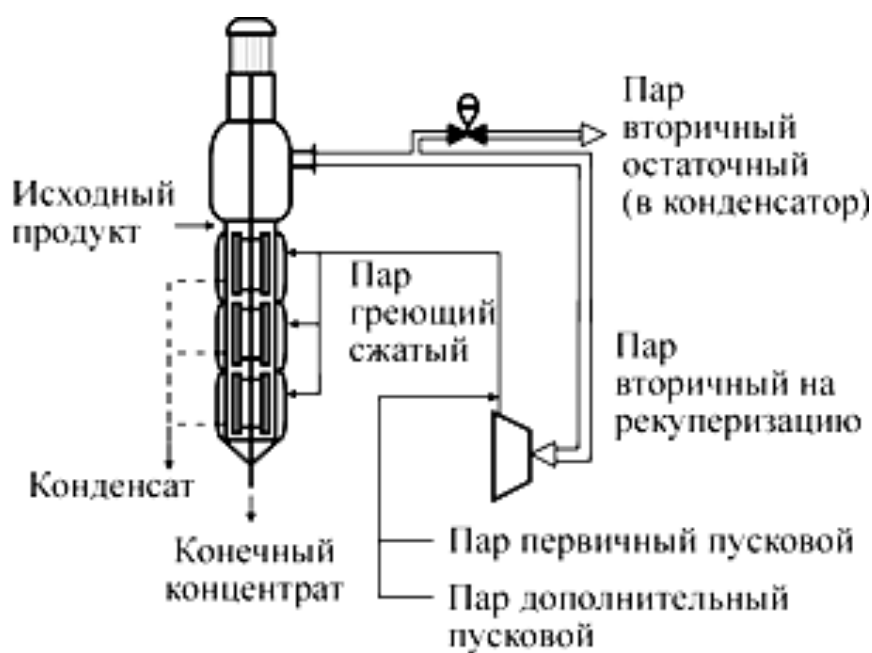


Рис. 5.6. ВУ с механическим компрессором вторичного пара

Механически наиболее выгодным является изотермический компрессор.

Удельная работа A по сжатию 1 кг пара (газа) определяется как:

$$A = p_1 v_1 \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right), \quad (5.20)$$

где p_1 и p_2 – давления соответственно перед и после сжатия; v – удельный объем.

При адиабатическом сжатии газа (пара):

$$A = i_2 - i_1, \quad (5.21)$$

Чаще всего компрессор осуществляет политропное сжатие:

$$A = \left(\frac{n}{n-1}\right) p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad (5.22)$$

где n – показатель политропы ($1 < n < k$, k – показатель адиабаты).

В указанных формулах работа будет большей на величину q_{mp} , соответствующую работе сил трения, которая не превышает, как правило, 10 % от величины A .

Для турбокомпрессоров, где процесс сжатия близок к адиабатному, работу определяют по формуле:

$$A = i_2 - i_1 + \frac{W_2^2 - W_1^2}{2} - q, \quad (5.23)$$

где q – поправка на отвод тепла и трение; $\frac{W_2^2 - W_1^2}{2}$ – поправка на разность скоростей на выходе и на входе в турбокомпрессор.

В многоступенчатых компрессорах наиболее выгодными являются режимы, когда степени сжатия на одной ступени (x_n) относятся к полной степени сжатия $x = \frac{p_2}{p_1}$, как $x_n = (x)^{\frac{1}{n}}$, где n – число ступеней сжатия. При этом для увеличения эффективности работы необходимо осуществлять охлаждение газа (пара) между ступенями сжатия, чтобы температура на входе последующей ступени совпадала с температурой на входе предыдущей ступени.

В реальных компрессорах мощность электродвигателя составляет 110–140 % от потребляемой компрессором при сжатии газа (пара) мощности. Таким образом, при сжатии пара, например в 3,5 раза, работа, затрачиваемая на сжатие пара в однокорпусной выпарной установке, может составить 10–15 % от тепловой нагрузки выпарной установки (при пересчете тепловой нагрузки и мощности электродвигателя компрессора в одни единицы измерения).

Очевидно, что чем больше степень сжатия, тем больше необходимая мощность компрессора, затрачиваемая на сжатие 1 т/ч вторичного пара. С учетом того, что стоимость 1 кВт ч электроэнергии значительно больше, чем стоимость энергии потребляемого водяного пара (в пересчете на кВт ч), использование механического компрессора с большими степенями сжатия может быть нерентабельным. Поэтому для сжатия вторичного пара чаще всего используют одноступенчатые турбокомпрессоры, повышающие давление в 1,2–1,7 раза и обеспечивающие общий полезный температурный напор на выпарную установку не более 15 °С.

При применении механического компрессора, работающего в сочетании с четырехкорпусной МВУ, можно достичь производительности выпарной установки в 100–125 кг выпаренной влаги на 1 кВт ч подводимой электроэнергии. Это означает, что потребляемая компрессором мощность составляет 1,3–1,5 % от тепловой нагрузки выпарной установки (очевидно, что при этом температурный напор на корпус МВУ не превысит 4 °С).

К главному недостатку выпарных установок с механическим сжатием пара можно отнести высокую стоимость предназначенных для этой цели компрессоров. Помимо этого, большая площадь поверхности теплообмена выпарной установки, обусловленная низкими температурными напорами, а также применение дополнительных элементов очистки вторичного пара (например, скрубберов), обусловленное повышенным требованием компрессоров к качеству сепарации вторичного пара и отсутствию у него коррозионной активности, обеспечивают высокий уровень амортизационных

расходов для таких выпарных установок. Механические компрессоры, предназначенные для повышения давления вторичных паров под вакуумом, выпускаются в ограниченных количествах в очень немногих странах, и зачастую эксплуатация выпарной установки с механическим сжатием пара требует разработки специально для нее предназначенного компрессора, что существенно увеличивает стоимость последнего. Выпарные установки с механическим сжатием вторичного пара имеют достаточно ограниченное применение. Чаще всего они используются в странах, где имеется дешевая гидроэлектроэнергия, а уровень цен на топливо, обеспечивающее получение пара, высок.

Выпаривание с применением теплового насоса основано на использовании вторичного пара в качестве греющего в том же выпарном аппарате. Для этого температура вторичного пара должна быть повышена до температуры греющего пара. Повышение температуры вторичного пара достигается сжатием его в компрессоре или паровом инжекторе. В качестве компрессора обычно используется турбокомпрессор (Рис. 5.7). Вторичный пар давлением P_{BT} и энтальпией i , выходящий из выпарного аппарата, засасывается в турбокомпрессор, в котором сжимается до давления P_I . Энтальпия при этом возрастает до $i_{сж}$. Таким образом, за счет сжатия пар приобретает теплоту

$\Delta i = i_{сж} - i$. Сжатый пар поступает из турбокомпрессора в греющую камеру выпарного аппарата.

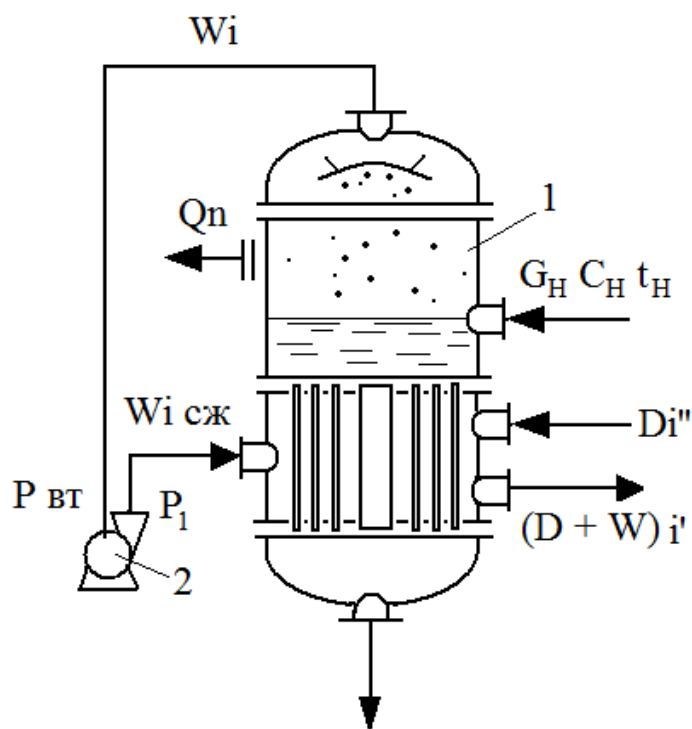


Рис. 5.7. Выпарной аппарат (1) с турбокомпрессором (2)

Тепловой баланс процесса:

$$G_H c_H t_H + Di'' + Wi_{сж} = G_K c_K t_K + Wi + (D + W)i' + Q_{\Pi}, \quad (5.24)$$

или

$$G_H c_H t_H + Di'' + Wi_{сж} = (G_K - W) + Wi + (D + W)i' + Q_{\Pi}, \quad (5.25)$$

откуда расход греющего пара

$$D = G_K \frac{c_K t_K - c_H t_H}{i'' - i'} + W \frac{i - c_H t_H - i_{сж}}{i'' - i'} + \frac{Q_{\Pi}}{i'' - i'}, \quad (5.26)$$

или

$$D = G_H \frac{c_K t_K - c_H t_H}{i'' - i'} + W \frac{i - c_K t_K - i_{сж}}{i'' - i'} + \frac{Q_{\Pi}}{i'' - i'}, \quad (5.27)$$

где $i_{сж}$ - удельная энтальпия вторичного пара после сжатия в турбокомпрессоре, кДж/кг; G_H, G_K - количество исходного и упаренного раствора, кг/с; c_H, c_K - удельные теплоемкости исходного и конечного раствора;

t_H, t_K – температуры исходного и конечного раствора, $^{\circ}\text{C}$; i – энтальпия вторичного пара кДж/кг·К;

i' – энтальпия конденсата, кДж/кг·К; i'' – энтальпия греющего пара, кДж/кг·К;

W – количество растворителя (воды), кг/с; D – количество греющего пара, кг/с;

Q_{Π} – потери теплоты в окружающую среду, кДж.

Из уравнения (5.27) видно, что при выпаривании с использованием теплового насоса расход греющего пара снижается за счет повышения энтальпии вторичного пара на величину $i_{сж}$

$$D = W \frac{i - c_H t_H - i_{сж}}{i'' - i'} \quad (5.28)$$

Однако наряду с экономией греющего пара необходимы затраты электроэнергии на приведение в действие турбокомпрессора. Мощность

$$N = \frac{W(i_{сж} - i)}{3600 \eta_{AD} \eta_{MEH}}, \quad (5.29)$$

где η_{AD} — адиабатический КПД турбокомпрессора; η_{MEH} — механический КПД электродвигателя и привода.

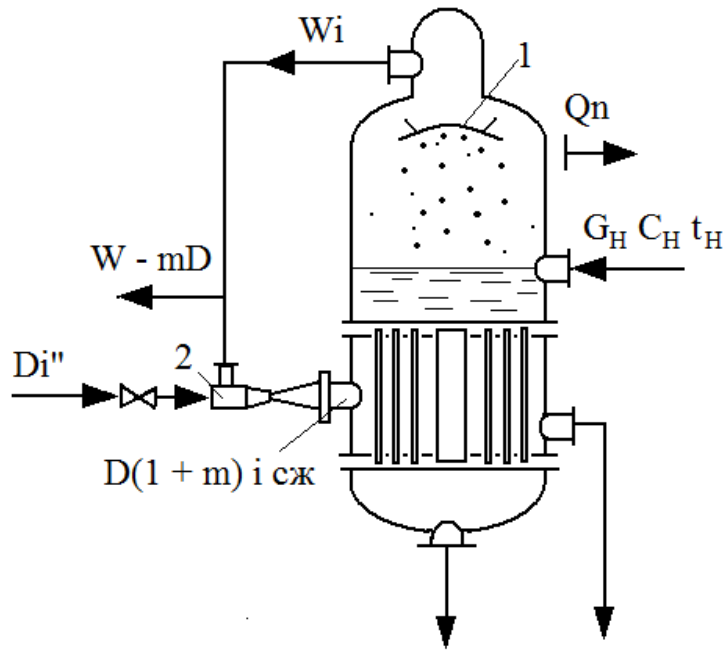


Рис. 5.8. Выпарной аппарат (1) с инжекторным тепловым насосом

Установка удорожается также на стоимость турбокомпрессора. В установках с паровым инжектором (рис. 5.8) греющий пар из котельной поступает в паровой инжектор. Паровой инжектор представляет собой несложное устройство типа сопла Вентури, при изготовлении которого не требуется значительных затрат металла. В результате создания вакуума в инжектор засасывается вторичный пар давлением P_{BT} и энтальпией i . Каждая массовая единица греющего пара засасывает m массовых единиц вторичного пара. В результате получают греющий пар в количестве $D(1 + m)$ с давлением меньшим, чем давление греющего пара, но большим, чем вторичного пара. Часть пара, равная $W - mD$, сбрасывается с установки на вторичные нужды.

Тепловой баланс процесса описывается равенствами

$$D(1 + m)i_{сж} + G_H c_H t_H = G_K c_K t_K + Wi + D(1 + m)i' + Q_{II}; \quad (5.30)$$

$$D = G_K \frac{c_K t_K - c_H t_H}{(1 + m)(i_{сж} - i')} + W \frac{i - c_H t_H}{(1 + m)(i_{сж} - i')} + \frac{Q_{II}}{(1 + m)(i_{сж} - i')} \quad (5.31)$$

5.5.3. ПУТИ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ В МАССООБМЕННОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Совершенствование технологического процесса сушки в АПК обусловлено необходимостью экономии энергоресурсов, улучшения качества продукции и повышения энергоэффективности ТП. Реализуются следующие направления:

- применение технологий, при которых на сушку поступают наиболее подготовленные к ней материалы (например, тонкодисперсные, с широкими порами и т. п.);
- разработка типовых сушилок, пригодных для сушки больших групп материалов;
- создание оптимальной гидродинамики в сушильных аппаратах;
- рациональное совмещение подготовительных стадий механического обезвоживания, выпаривания (для сгущения жидкой фазы), предварительного перегрева растворов (при распылительном высушивании) и собственно сушки;
- развитие нетрадиционных способов сушки-ИК и УФ излучением, высокочастотной, СВЧ и акустической, со сбросом давления (в материале происходят самовскипание и частичный механический вынос влаги), перегретым паром (его теплоемкость больше теплоемкости воздуха, поэтому к материалу подводится большее количество теплоты), с использованием ПАВ (они ослабляют связь влаги с материалом);
- применение комбинированных сушилок - с комбинированным подводом теплоты, а также сочетающих сушку с другими процессами (измельчением, гранулированием, химическими реакциями и т. д.);

- использование экологически рациональных сушилок - безуносных (сушка происходит одновременно с улавливанием готового продукта, например в сушилках со встречными закрученными потоками), с организацией процесса таким образом, чтобы на пылеочистку поступало меньшее количество крупнодисперсного материала, а также с максимальной утилизацией теплоты отработанного сушильного агента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подготовка кадрового обеспечения решения отраслевой проблемы повышения энергоэффективности (приоритетный в АПК) будет результативной только после целенаправленного функционирования набора изучаемых дисциплин и их содержания. Научной школой кафедры «Энергообеспечение производств и электротехнологии в АПК» предложен базовый объект изучения – потребительская энергосистема (ПЭС) предприятия, представляющая собой совокупность технических элементов (не только энергетических), характеризующихся собственными показателями эффективности осуществляемых ими энергетических процессов. Влияние этих показателей на единый системный (для ПЭС это энергоемкость продукции) зависит от величины проходящей через элемент энергии, удельного расхода энергии, от получаемого процессового результата и от места (эмпирического адреса) элемента в общей системе.

Задачами учебного пособия «Прикладная теория тепловых и массообменных и процессов в системном анализе энергоемкости продукции» и одноименной дисциплины, включенной в общенаучный цикл ООП «Агроинженерия» (профиль «Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве») является:

- ознакомление с системным анализом тепломассообменных процессов, аппаратов и установок в потребительских энергосистемах сельскохозяйственных производств;
- освоение общих закономерностей протекания тепломассообменных процессов в аппаратурно-технологических схемах ПЭС;
- овладение теорией и современными методами расчета тепломассообменных процессов, аппаратов и установок;

- освоение принципов блочно-иерархического моделирования тепломассообменных процессов, аппаратов и установок ПЭС;
- изучение методов, алгоритмов расчета и оптимизации тепломассообменных процессов по критерию энергоемкости продукции;
- формирование навыков применения энергосберегающих принципов и схем организации тепломассообменных процессов, аппаратов и установок при оптимизации энергоемкости продукции, а также при их проектировании и энергетической модернизации.

Приобретаемая магистрантами в университете способность управлять эффективностью ПЭС возможна только через приобретение ими системных знаний по теории и прикладным законам наиболее распространенных в линиях переработки сырья тепломассообменных процессов, по методам единых критериальных оценок эффективности всего разнообразия энергетических процессов, по современным информационным технологиям, позволяющим использовать данные для системного анализа эффективности ПЭС. В ПЭС принимаемые решения по повышению энергоэффективности являются системными.

Учебное пособие соответствует этим требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрющенко А.И. Основы технической термодинамики реальных процессов. М.: Высшая школа, 1975. - 264 с.
2. Алексеев В.В. Энерготовар и рынок //В сб. трудов «Энергосбережение в сельском хозяйстве». — М.: Изд-во ВИЭСХ, 2000. - С. 151-157.
3. Барисович В.А., Смирнов Ю.А. Основы технической термодинамики и теории тепломассообмена. Курс лекций. - СПб.: СПбГПУ, 2010. - 258 с.
4. Беззубцева М.М., Мазин Д.А. Энергетика технологических процессов в АПК. Лабораторный практикум. – СПб.: СПбГАУ, 2009. – 122с.
5. Беззубцева М.М., Волков В.С. и др. Энергетика технологических процессов в АПК. – СПб.: СПбГАУ, 2011. – 266с.
6. Ветошкин А. Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды. Учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2008. – 639с.
7. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы. Учебное пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. –188с.
8. Ветров В. А. Разработка энергосберегающей безотходной технологии сушки свекловичного жома с обоснованием параметров сушильной установки: диссертация ... кандидата технических наук: 05.20.01 Белгород, 2007. – 168с.
9. Грот С.Р., Мазур П. Неравновесная термодинамика, М.: Мир, 1964.
10. ГОСТ Р 51750-2001- Энергосбережение. Методика определения энергоемкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах. Общие положения. Дата введения 2002—01—01
11. Данилов О.Л. Энергосбережение в энергетике и технологиях. М.: МЭИ, 2003. – 32 с.
12. Документ МГС «Энергосбережение. Методика определения полной энергоемкости продукции, работ и услуг». (Технический секретариат

Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации № 3229 от 19 марта 1999 г.)

13. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1995. – Ч. 1. – 400 с.
14. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Изд. 3-е. в 2-х кн: часть 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. - М.: Химия, 2002. – 400 с.
15. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник для вузов. Изд. 3-е. в 2-х кн: часть 2. Массообменные процессы и аппараты. - М.: Химия, 2002. – 400 с.
16. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.
17. Задорский В.М. Интенсификация химико-технологических процессов на основе системного подхода. – Киев: Техника, 1989. – 208 с.
18. Каневец Г.Е., Евдокимов В.Ю., Розенфельд А.И.. Иерархия критериев эффективности химико-технологических, энерготехнологических и теплоэнергетических систем и их элементов // Хим. технология. – 1987. – № 5. – С. 5 –13.
19. Карабасов Ю.С., Чижикова В.М., Плущевский М.Б. Экология и управление. Термины и определения. — М.: МИСИС, 2001. – 256 с.
20. Кардашев Г.А. Физические методы интенсификации процессов химической технологии. – М.: Химия, 1990. – 208 с.
21. Карпов В.Н., Юлдашев З.Ш. Энергосбережение и метод конечных отношений.-СПб.: СПбГАУ 2010. – 147 с.
22. Карпов В.Н., Беззубцева М.М. и др. Способ контроля и управления энергопотреблением. Патент № 2212746 РФ.Опубл. 20.09.2003. Бюл. № 26.
23. Карпов В.Н. Введение в энергосбережение на предприятиях АПК. – СПб.: СПбГАУ, 1999. – 72 с.

- 24.Карпов В.Н., Ракутько С.А.. Способ энергосбережения в энерготехнологических процессах. Патент № 2357342 РФ. Оpubл. 27.05.2009. Бюл. №15.
- 25.Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. - М., 2005. – 753с.
- 26.Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Кн. 5: Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
- 27.Леонтьева А.И., Брянкин К.В., Дегтярев А.А., Орехов В.С. Научные основы техники сушки термолабильных материалов. - М.: Академия Естествознания, 2011. – 203с.
- 28.Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники: Учеб. пособие. 2-е изд., стер. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2005. –260с.
- 29.Малин Н.И.Энергосберегающая сушка зерна. - М.: КолосС. 2004. – 240 с.
- 30.Немчин А.Ф. Новые технологические эффекты тепломассопереноса при использовании кавитации // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 39 – 47.
- 31.Никифоров А.Н., Токарев В.А. и др. Методика энергетического анализа технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. — М.: ВИМ, 1995
- 32.Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение, 2001. – 260с.
- 33.Промтов М.А.Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества: Учебное пособие. – М.: «Издательство Машиностроение –1», 2004. – 136 с.
- 34.Иванец В.Н., Крохалев А.А., Бакин И.А. Процессы и аппараты пищевых производств: конспект лекций по курсу ПАПП Ч. 2. Кемерово: КТИПП, 2002. – 268 с.
35. Потапов А.Н. .Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2002. – 140 с.

36. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. В 5 т. Т. 2: Механические и гидромеханические процессы / Под ред. А.М. Кутепова – М.: Логос, 2001. – 600 с.
37. Р 50-605-89–94. Рекомендации по стандартизации. Энергосбережение. Порядок установления показателей энергопотребления и энергосбережения в документации на продукцию и процессы. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996
38. Ракутько, С.А. Прикладная теория энергосбережения в энерготехнологических процессах АПК: основные положения и практическая значимость / С.А.Ракутько // Известия РАН. Энергетика.- 2009.-№6. –С.168-175.
39. Рекомендации по стандартизации. Методы подтверждения показателей энергетической эффективности общие требования. Госстандарт России. - М.: 2000 № 428-ст.
40. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 584с.
41. Сажин Б.С., Булеков А.П. Эксергетический метод в химической технологии. – М.: Химия, 1992. – 208 с.
42. Салихов З.Г. Системы управления сложными технологическими объектами. Монография. – М.: Теплоэнергетик, 2004. – 495с.
43. Светлов Ю.В. Интенсификация тепловых гидродинамических процессов в аппаратах с турбулизаторами потока. Теория, эксперимент, методы расчета. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 304с.
44. Семенов Г. И. Касьянов. Сушка сырья: мясо, рыба, овощи, фрукты, молоко. Издательство: МарТ, 2002.– 112с.
45. Систер В.Г., Мартынов Ю.В. Принципы повышения эффективности тепломассообменных процессов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 1998. – 508с.

- 46.Справочник по теплоснабжению сельскохозяйственных предприятий /В.В.Жабо, Д.П.Лебедев, В.П.Мороз и др. Под общ. ред.В.В. Уварова. – М.: Колос,1983.– 320с.
- 47.Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 663 с.
- 48.Стандарты серии управления энергоэффективностью BS EN 16001:2009 и ISO 50001.
- 49.Стратегия инновационного развития агропромышленного комплекса российской Федерации на период до 2020 года. Москва. 2011.
- 50.Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. М.: Изд-во МГТУ, 1997. – 165 с.
- 51.Эткин В.А. Термокинетика (термодинамика неравновесных процессов переноса и преобразования энергии). Тольятти, 1999.
- 52.Эткин В.А. К термодинамической теории производительности технических систем. //Изв. АН СССР. Энергетика, 2000.- №1.-С.99 -106.
- 53.Эткин В.А. Соотношения взаимности обратимых процессов. //Сиб. Физ.-техн. Журнал, 1993. Вып.1. С. 2117-2121.
- 54.Эткин В.А. Синтез и новые приложения теорий переноса и преобразования энергии: Дисс. ...д-ра техн. наук. М., 1998. – 213 с.
- 55.Федеральный закон Российской Федерации от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации " Опубликовано 27 ноября 2009 г. Вступает в силу 27 ноября 2009 г.
56. Хаазе Р. Термодинамика необратимых процессов, М.: Мир, 1967.
- 57.Чагин О.В. , Кокина Н.Р., Пастин В.В. Сушильное оборудование для продуктов. – Иваново: Иван. хим. - технол. ун-т, 2007. –138с.
58. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009г.

59. С. Делятицкий, И. Зайонц, Л. Чертков, В. Экзарьян Экологический словарь
Ред.: Ю. Калешук, С. Смородкин; Худ. К. Федин.-М.: Конкорд Лтд- Эконом,
1993. - 208 с.
60. International Standard ISO 13600 Technical energy systems — Basic concepts.
First edition 1997-11-15 (Международный стандарт ИСО 13600:1997.
Энергосистемы технические. Основные понятия)

Термины и определения из международного стандарта ИСО 13600

Энергоносители: Вещество или явление, которое может быть использовано для производства механической работы или нагрева, или химических реакций, или физических процессов.

Энерготовар: Готовый (годный к продаже, предназначенный для продажи) товар, используемый, главным образом, для производства механической работы или тепла, или химических реакций, или физических процессов. (см. приложение 2)

Примечания:

1 Термин «**energyware**» может быть переведен как «энерготовар», но в русском языке он, как правило, фигурирует как «**энергия**» не в философском, а в чисто техническом смысле. В соответствии со стандартом ИСО 13600 используются адекватные термины «**энергоресурсный товар**», «**энергоресурсы**».

2 Энерготовар формально, в собственном смысле, относится (является частью) к энергоносителям. В общественном сознании положение энергоносителей является пока подчиненным по отношению к энергии в целом.

Система, расходующая энергоресурсы (система энергопотребления): Техническая энергосистема, расходующая энергетические ресурсы, а также другие энергетические носители и производящая продукцию, услуги.

Область потребностей в энергоресурсах (энергообеспечение): Часть техносферы, цель которой — производить необходимое количество энергоресурсов и добывать природные ресурсы.

Система производства энергоресурсов: Техническая энергосистема, которая преобразует природные ресурсы в энергоресурсы.

Система утилизации (возврата, восстановления) энергоресурсов: Техническая энергосистема, которая трансформирует вторичные ресурсы

(подлежащие возврату, возвращаемые отходы, сбросы и выбросы — биосферозагрязнители) в энергоресурсы.

Система хранения энергоресурсов (энергонакопители): Техническая энергосистема, которая может получать и хранить энергоресурсы, освобождая их позже в том же виде.

Нагрузка на окружающую среду: Истощение природных ресурсов, накопление отходов, сбросов и выбросов, эксплуатационные воздействия.

Природные ресурсы: Вещества или явления, находящиеся в природе, которые могут использоваться в техносфере для потребления.

Продукт: Преднамеренный реальный (материальный) выход (отдача) технической энергосистемы.

Услуга: Преднамеренный и неосязаемый (неуловимый, не материальный) продукт технической энергетической системы или польза от применения продукта.

Примечание — Услуга, как правило, реализуется с участием людей (необходимое условие), хотя и не всегда при ее реализации непосредственно участвует энергосистема (достаточное условие), например при устном переводе текста с языка на язык, при обучении на воздухе (вне помещений), как это было, например в Академии Платона и т. д.

Техническая энергетическая система: Комбинация оборудования и предприятия (завода), взаимодействующих друг с другом для производства, потребления или, во многих случаях, преобразования, хранения, транспортирования или обработки энерготовара (как энергоресурса).

Техносфера: Все технические энергетические системы и продукты, производимые ими, в том состоянии, при котором они не будут считаться выбросами.

Дополнительные основополагающие термины и понятия в техно- и биосфере

Система (греч.): Множество закономерно связанных между собой элементов (предметов, явлений, взглядов и т. д.), представляющих собой целостное образование, единство. **Система открытая (традиционно):** Система, состав, информация и энергия которой изменяются из-за обмена ими с внешней средой.

Ноосфера: Сфера разума, мыслящая оболочка, высшая стадия развития биосферы, связанная с возникновением и развитием в ней мыслящего человечества (по В. И. Вернадскому).

Экосфера (от греч. «ойкос» — дом и сфера — шар): Абиотическая среда Земли, создающая условия для жизни.

Техносфера: Стратегическое пространство взаимодействия ресурсов ресурсосферы, оборудования и людей социосферы, которые в технологических процессах преобразования сырья, материалов, комплектующих изделий в данное время и в данном месте реализуют заранее поставленные цели хозяйственного развития и выпуска продукции в производственной товаросфере с условием сохранения биосферы.

Биосфера (от греч. «биос» — жизнь и сфера — шар): Область распространения жизни на Земле, включающая в себя нижнюю часть атмосферы, всю гидросферу, верхнюю часть литосферы и являющуюся самой крупной экосистемой Земли, населенной живыми организмами. **Социосфера:** Социальная общность людей, вступающих в различные производственные, культурные и родственные отношения друг с другом и окружающей средой.

Ресурсосфера: Содержащиеся в Земле природные залежи полезных ископаемых, используемых для поддержания и развития цивилизации.

Ресурсы: Любые используемые и потенциальные источники удовлетворения тех или иных потребностей общества.

Система управления окружающей средой: Часть общей системы административного управления, которая включает в себя организационную структуру, планирование, ответственность, методы, процедуры, процессы и ресурсы, необходимые для разработки, внедрения, реализации, анализа и поддержания экологической политики (ГОСТ Р ИСО 14050).

Биосферозагрязнитель; БСЗ: Электромагнитное излучение, твердые отходы, жидкие сбросы, газообразные выбросы или их сочетания, угнетающе действующие на биоестественную и техногенную среды, а также на живые организмы.

Стратегическое оценивание (энергетического объекта): Экспертная оценка энергетического объекта, включая техническое решение, производство, сооружение, энерготовар, процесс, работу, услугу, с учетом четырех групп «Требований общества», в соответствии с которыми на основе теории стандартософии сформирована «рамочная» технология анализа ограничений от четырех обязательных блоков аспектных стратегий любой деятельности, в т. ч. по энергопотреблению, энергосбережению: производственных, экологических, социальных и ресурсных (рисунок П.1), совместная, одновременно учитываемая совокупность которых определяет состоятельность, устойчивость хозяйственно-экономической, организационно-политической, познавательно-образовательной и любой иной деятельности на стадиях жизненного цикла энергетического объекта в настоящее время и в перспективе развития.

Аспекты деятельности; аспектные стратегии стандартософии: Четыре обязательных вида деятельности, включая производственно-технологическую, технологическую, экологическую, социальную и ресурсную, обеспечивающие при одновременном учете и реализации надежность изделий, защиту окружающей среды, безопасность людей, сбережение материальных и энергетических ресурсов, что соответствует международным «Требованиям общества».

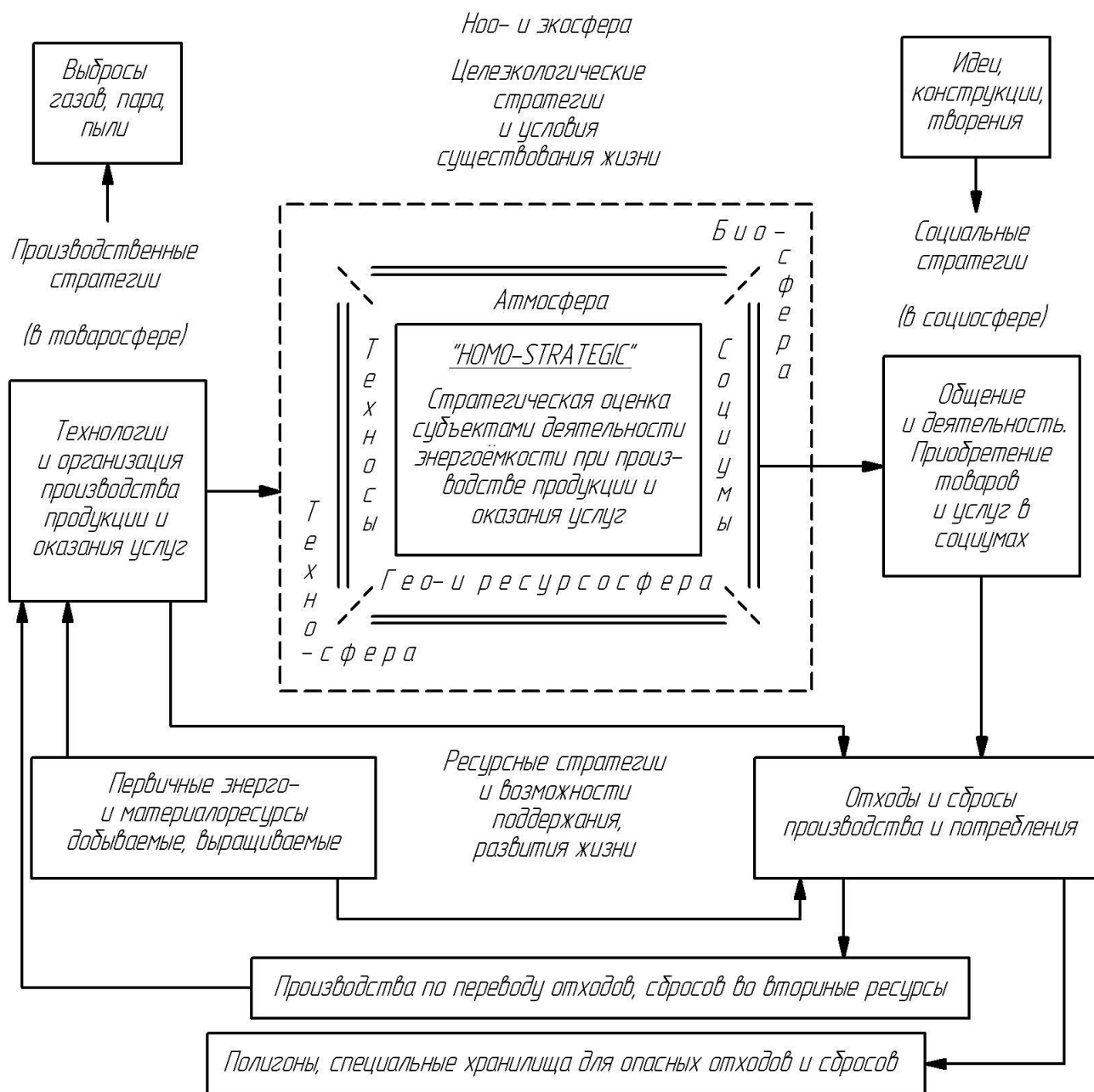


Рис. П.1 — Стратегическая структуризация сфер жизнедеятельности общества во взаимодействии техносферы с биосферой. (Модель «HOMO-STRATEGIC» на основе ИСО 13600)

**Традиционные энергоресурсные продукты (энерготовары) согласно приложению А
ИСО 13600**

1 Твердое топливо	
Энергетический уголь	Весь уголь, извлеченный из земли, за исключением металлургического угля для фильтров
Энергетический торф	Торф, энергетически отличающийся от торфа, используемого для усовершенствованной почвы (грунта) или других целей
Коммерческие дрова	Щепки дерева и тырса - подэлементы коммерческих дров, используемых как энергопродукт (энерготовар)
Другая биомасса	«Энергетические» лес, солома, тростник, высушенный коровий навоз, кустарник, стручки семян, используемые в качестве топлива
Топливные брикеты и гранулы	Горючее вещество ископаемого или биологического происхождения в форме порошка, зерен (гранул) и мелкой щепы, уплотненных в блоки для механизации погрузочно-разгрузочных работ
Древесный уголь	Твердый осадок деструктивной перегонки и пиролиза дерева, кроме древесного угля для фильтров
Кокс	Твердое топливо, полученное из угля путем нагрева в отсутствие воздуха
2 Жидкое топливо	
Сырая нефть	Неизвлеченная нефть, не являющаяся энергопродуктом. Она становится энергопродуктом сразу, как только добывается (извлекается)
Нефтепродукты: - моторный газولين - авиационный газولين - другой керосин - дизельное топливо - газойль для отопления - топливная нефть	Могут быть приведены в группах различных энергопродуктов. Любая из отдельных жидких смесей быстроиспаряющегося углеводородного бутана и пропана
LPG (сжиженный нефтяной газ)	Пребывает в газообразном состоянии при атмосферном давлении и становится жидким при 15 °C и под низким давлением от 0,17 до 0,75 МПа
Получистые продукты	Жидкие углеводороды, включаемые в список энергопродуктов независимо от того, используются ли они для производства топлив или как нефтехимическое исходное сырье. Нефтяной кокс — не энергопродукт, даже если значительное количество используется как топливо
Моторные спирты	Этиловый спирт, метиловый спирт с добавками и смесями из составов и групп органических кислородосодержащих составов (эфир и спирты) с легкими топливами
NGL (газоконденсатные жидкости)	Жидкие части природного газа, которые восстановлены (регенерированы) в сепараторах, шахтном оборудовании и газогенераторных установках
Топлива, производимые из растительных и животных масс	Растительные и животные масла, извлеченные из различных растений и животных

**(Окончание) Традиционные энергоресурсные продукты (энерготовары) согласно
приложению А ИСО 13600**

3 Газообразное топливо	
Топливо из природного газа:	
- природный газ	Метан и газовые смеси
- LNG (сжиженный природный газ)	Природный газ, сжижаемый при низкой температуре для последующего хранения и транспортирования
Преобразование (конвертированное) газообразное топливо:	
- газ, извлеченный из угля	Получаемый из угля
- топочный газ - газифицированная биомасса (или биомасса в газообразном состоянии) - газ, получаемый при перегонке (нефтезаводской [неконденсирующийся])	Получаемый из металлургического угля
- газ бытового назначения (коммунальный или городской)	Газ, производимый для общественного (коммунального) снабжения
- биогаз (биомасса)	Составленный главным образом из смеси метана и диоксида углерода, произведенной анаэробным вывариванием биомассы; метан, отделяемый вне этой смеси, назван «биометаном». Газ из жидкого навоза, болотный газ, газ от мусора (свалок) и т. д.
4 Водород	
	В газообразной или жидкой форме, получаемый из ископаемых или возобновляемых источников
5 Ядерное топливо	
	Уран, торий и плутоний — расщепляющиеся и воспроизводящиеся материалы (элементы)
6 Сетевое электричество (или электричество энергосистемы)	
	Энергопродукт, произведенный в силовых установках и распределенный по общественной или подобной сети
7 Коммерческое тепло, районное тепло	
	Горячая жидкость или пар, используемые в коммерческих тепловых распределительных системах, полученные из других энергопродуктов, возобновляемых ресурсов, включая такие, как солнечная радиация и геотермальное тепло

ОГЛАВЛЕНИЕ

Прелисловие.....	3
Глава 1. Методология системного анализа потребительских энергосистем (ПЭС).....	6
1.1. Системность изучения.....	6
1.2. Естественнонаучная методология и системный подход...	8
1.3. Системная деятельность.....	9
1.4. Подходы к анализу и проектированию систем.....	10
1.5. Разработка методик системного анализа.....	12
1.6. Системный подход к проблеме повышения энергоэффективности производства сельскохозяйственной продукции.....	16
Глава 2. Прикладная теория теплообменных процессов.....	28
2.1. Общие сведения.....	28
2.2. Тепловой баланс.....	30
2.3. Основные уравнения теплопередачи.....	31
2.4. Передача теплоты теплопроводностью и конвекцией.....	32
2.5. Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена.....	36
2.6. Тепловое подобие.....	37
2.7. Теплоотдача без изменения агрегатного состояния.....	39
2.8. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния.....	41
2.9. Теплоотдача через плоскую стенку.....	42
2.10. Движущая сила теплообменных процессов.....	44
2.11. Конденсация.....	46
2.12. Метод формального анализа интенсификации тепловых процессов.....	48
Глава 3. Прикладная теория массообменных процессов.....	50
3.1. Общие сведения о массообменных процессах.....	50
3.2. Материальный баланс массообменных процессов.....	52
3.3. Модифицированные уравнения массопередачи.....	54

3.4.	Основные законы массопередачи.....	56
3.5.	Массопередача в системах с твердой фазой	64
3.6.	Метод формального анализа параметров, влияющих на интенсивность ТП.....	65
Глава 4.	Законы равновесия. Равновесное состояние. Направление протекания и движущая сила технологических процессов теплообмена.....	67
4.1.	Условия термического равновесия и массопереноса.....	67
4.2.	Движущая сила теплообменных процессов.....	70
4.3.	Направление протекания теплообменных процессов.....	72
4.4.	Кинетические закономерности процессов переноса веществ.....	74
Глава 5.	Методика определения энергоемкости продукции в потребительских энергосистемах АПК.....	76
5.1.	Концепция оценки топливно – энергетической эффективности производства АПК. Общие сведения и постановка задачи.....	76
5.2.	Основные элементы методики определения энергоемкости производства продукции и оказания услуг в технологических энергетических системах.....	78
5.2.1.	Структура и смысловое наполнение элементов методики определения энергоемкости в технологических энергетических системах.....	78
5.2.2.	Характер возможных энергопотерь и направления их снижения на стадиях жизненного цикла продукции и исполнения услуги.....	80
5.2.3.	Обобщенный алгоритм получения результатов определения (оценки) технологической энергоемкости производства продукции и исполнения услуг.....	83
5.2.4.	Формы документирования исходных данных и результатов.....	89
5.3.	Индексный метод учета влияния значительности воздействия технологической энергетической системы на окружающую среду.....	90
5.4.	Методика оценки энергоэффективности электротехнологических процессов сельскохозяйственного производства.....	93
5.5.	Энергосберегающие технологии процессов теплообмена в перерабатывающих производствах АПК.....	95

5.5.1. Пути экономии энергии в тепловых процессах ректификации.....	95
5.5.2. Пути экономии энергии в тепловых процессах при концентрировании растворов выпариванием.....	98
5.5.3. Пути экономии энергии в массообменном процессе сушки.....	110
Заклучение.....	112
Библиографический список.....	114
Приложения.....	120

**ПРИКЛАДНАЯ ТЕОРИЯ ТЕПЛОВЫХ
И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ
ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОДУКЦИИ**

Учебное пособие

Марина Михайловна Беззубцева
Владимир Сергеевич Волков
Вячеслав Викторович Зубков

Редактор В.В.Тишин
Корректор А.С. Янбухтин

Подписано в печать 05.04.2013
Бумага офсетная. Формат 60/90 1/16
Печать трафаретная. 8,25 усл. печ. л.
Тираж 100 экз
Заказ № 13/04/07

Отпечатано с оригинал-макета заказчика
в НП «Институт техники и технологий»
Санкт-Петербург-Пушкин, Академический пр., д. 31, ауд. 715