

# ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД КАК ЕДИНАЯ БАЗА ДАННЫХ ПРИ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАНОНИЧЕСКИХ АНСАМБЛЕЙ ФИЗИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Часть 2

### Введение

Эффективное решение задач энергосбережения путем разработки и совершенствования современных технологий и оборудования возможно осуществить при дальнейшем развитии теоретической базы и инженерных методов анализа в этой области. Стратегия системного подхода в энергосбережении - это

принципы достижения конечной цели исследований и разработок - создания высокоэффективных энергосберегающих физико-технологических систем. Данная стратегия отражена в разрабатываемом нами топологоэксергетическом методе анализа физико-технологических систем (ФТС), который объединяет достоинства эксергетического и топологи-

ческого (диаграмм связи) методов [1-19].

Концепция, развиваемая авторами в первой части этой статьи, предполагает передачу ЭВМ большей части работ, выполняемых как при подготовке к моделированию, так и в процессе исследования на модели объектов большой сложности с позиции энергосбережения. При этом сформулирован теоретико-множественный подход для реализации топологоэксергетического принципа моделирования при системотехническом проектировании канонических ансамблей физико-технологических систем (КА ФТС).

#### Постановка задачи

На основании топологоэксергетического метода формализации структурно реализовать на конкретных примерах создание базы данных системотехнического проектирования КА ФТС.

#### Методика решения

**Подход, основанный на многосвязной модели КА ФТС**

Основой нашего подхода к построению единой базы данных при системотехническом проектировании канонических ансамблей физико-технологических систем является многосвязанная модель и соответствующее ей представление - топологоэксергетическая структура связи [14-19, 24].

При создании многосвязной модели технического устройства как элемента КА ФТС первым делом необходимо уделить основное внимание обмену энергией (эксергией) и сигналами между устройством и средой. Для этого определим число и типы пар связей, соответствующих такому обмену энергией (эксергией) и сигналами. Пары связей представлены графически линиями, устройство фиксируется своим названием.

Рассмотрим несколько примеров технических устройств и соответствующие им структуры связи.

На рис.1а представлен пневматический мембранный исполнительный механизм (ПМИМ) как устройство КА ФТС, совмещающее две функции - исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО), а на рис. 1б- его структура связи.

На рис.1в представлен электрический двигатель, а на рис.1г изображены две электрические связи (поле, якорь) и одна механическая связь (вал). Энергетическая мощность каждой связи разделена на две эксергетические составляющие переменные (например, напряжение - ток, вращающий момент - угловая скорость). Положительное направление эксергетической мощности

указано полустрелкой. В качестве следующего примера рассмотрен вентилятор с регулирующим устройством (положение х), изображенный на рис.1д. Топологоэксергетическая структура связи этого вентилятора представлена на рис.1е. Аппарат фонтанирующего слоя (ФС) с обрабатываемой средой представлен на рис.1ж, где 1 - аппарат ФС с обрабатываемой средой; 2 - пристеночная зона ФС; 3 - зона ядра ФС. Для аппарата ФС упрощенная топологоэксергетическая структура связей изображена на рис.1з.

Соединяя многосвязные модели устройств и обрабатываемой среды КА ФТС в соответствующих точках, можно получить модель системы. Например, для случая, когда рассматривается КА ФТС, осуществляющий управление подачей оживающего агента в аппарат ФС и состоящий из цепочки элементов: двигатель - вентилятор - исполнительный механизм - регулирующий орган - обрабатываемая среда, получим топологоэксергетическую модель, представленную на рис.2

Отметим, что в рассматриваемом случае осуществляется преобразование мощности (эксергии) - электрической, механической и гидравлической мощности (эксергии), при этом все три типа мощности (эксергии) находятся в соответствии друг с другом.

Совместимость графического представления механической, электрической, гидравлической, тепловой, химической и других потоков энергий (эксергии), а также потоков сигналов является полезным и мощным средством, присущим рассматриваемому подходу.

На следующем этапе формирования базы данных КА ФТС необходимо дополнить модели устройств и обрабатываемых сред рядом структурных характеристик.

**Топологоэксергетическая детализация моделей устройств и обрабатываемых сред КА ФТС.** Процесс дополнения моделей устройств и обрабатываемых сред КА ФТС структурными характеристиками называется детализацией [3, 22, 24]. При дополнении моделей характеристиками необходимо иметь в виду два принципиальных фактора:

1. Учет основных энергетических (эксергетических) эффектов (например, потеря, преобразований, емкости, инерционности).
2. Учет геометрии (например, учет того, что нагрузки на вал имеют распределенный характер).

Рассмотрим каждый из этих факторов по порядку.

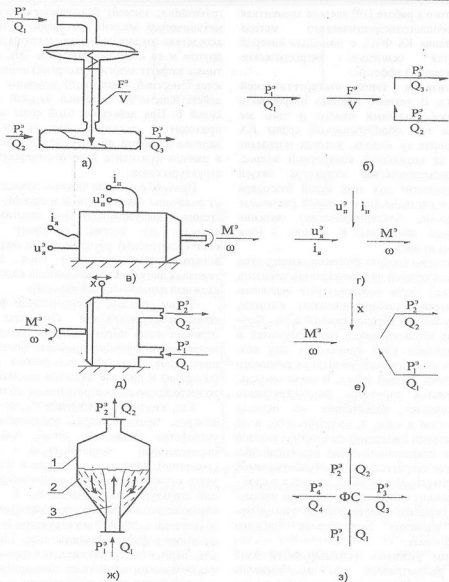


Рис.1. Примеры КА ФТС устройств и их многосвязные модели

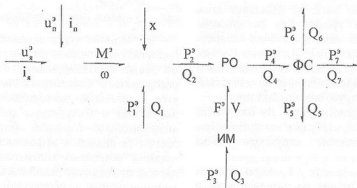


Рис.2. Структура связей управляемого аппарата ФС

Для этого в работе [19] введена элементная база топологоэксергетического метода моделирования КА ФТС, с помощью которой учитываются основные энергетические (эксергетические) эффекты.

Детализация топологоэксергетической структуры. В технике принято оперировать несколькими моделями одного и того же устройства или обрабатываемой среды КА ФТС, выбирая ту модель, которая позволяет ответить на возникший конкретный вопрос. Топологоэксергетическая структура связей хорошо подходит для этих целей благодаря простоте и наглядности, с которой различные энергетические (эксергетические) явления могут быть включены в модель (или исключены из нее).

Рассмотрим аппарат фонтанирующего слоя (рис.1ж) как пример четырехсвязного элемента (рис.1з), где связи соответствуют основным энергетическим (эксергетическим) потокам, распределяемым в обрабатываемой среде. Формирование неравномерного поля скоростей в фонтанирующем слое происходит под воздействием кинетической энергии подводимого извне потока газовой струи. В свою очередь, гидравлическая структура фонтанирующего слоя оказывает воздействие на перепад давления газа в слое, а, следовательно, и на подвод энергии (эксергии) со стороны газовой струи, т.е. гидродинамические характеристики слоя - поле скоростей частиц обрабатываемой среды (материала) и перепад давления в слое - связаны между собой. Эта физическая взаимосвязь и отражает энергетическое (эксергетическое) единство гетерофазной системы «материал - газ».

В этих условиях фонтанирующий слой можно рассматривать как относительное перемещение в поле сил двух переменных эквивалентных масс - зоны ядра ( $M_1$ ) и пристеночной зоны ( $M_2$ ).

На каждую из масс  $M$  действует сила тяжести  $F_t$ , сила трения  $F_{тр}$  со стороны материала соседней зоны и о стенки аппарата и, наконец, внешняя сила  $F$  со стороны газовой струи. Внешняя сила является вынуждающей и наличие ее обусловлено большой кинетической энергией газовой струи, подводимой извне.

Баланс сил, действующих на любую из эквивалентных масс, отображается фрагментом топологоэксергетической структуры связи (рис.3а).

На рис.3а элемент  $S$  характеризует действие поля тяготения на материал зоны и затраты энергии (эксергии) на преодоление сил

гравитации; элемент  $R$  отражает диссипацию механической энергии (эксергии) в аппарате вследствие соударения частиц материала друг с другом и со стенками аппарата. Эти необратимые затраты энергии (эксергии) компенсируются энергией (эксергией) газового потока, действующего на материал каждой зоны с силой  $F$ . Под действием этой силы масса  $M$  приходит в движение, что обуславливает наличие элемента инерционности ( $I$ -элемента) в данном фрагменте топологоэксергетической структуры связи.

Причем, если сила тяжести зависит лишь от величины эквивалентной массы  $M$ , то сила трения и вынуждающая сила изменяются во времени по весьма сложному закону, соответствующему распределению скоростей в аппарате фонтанирующего слоя. В этих условиях движение эквивалентной массы носит сложный неравномерный характер.

Таким образом, рассмотренный фрагмент топологоэксергетической структуры связи отражает лишь затраты энергии (эксергии) на непрерывное функционирование фонтанирующего слоя. Так как источником энергии (эксергии) в системе является газовый поток, то необходимо рассмотреть баланс по газу.

Газ, сжатый до давления  $P_0$  на входе в аппарат, проходя через распределительное устройство (подающее устье), приобретает определенную кинетическую энергию (эксергию). Моделью процессов в подающем устье служит фрагмент топологоэксергетической структуры связи, рис.3б, где  $I$  - элемент отражает динамические характеристики входного устья, а  $\Delta P = P_0 - P$  на структуре  $I$  - перепад давления в фонтанирующем слое. Кинетическая энергия (эксергия) газовой струи согласно аналитическим свойствам топологоэксергетической модели устья определяется следующим выражением:

$$E^3 = Q \cdot \Delta P,$$

где  $Q$  - поток газа, поступающего в слой.

Подводимая через входное устье энергия (эксергия) различным образом распределяется по зонам фонтанирующего слоя. Подвод и распределение этой энергии (эксергии) отражается с помощью проводников энергии (TF-элементов) и 0-структуры (рис.3в). Причем коэффициенты передачи ( $m_1$  и  $m_2$ ) TF-элементов являются эффективными гидравлическими сечениями соответствующих зон и зависят от гидравлической обстановки в слое и конструктивных особенностей аппарата (его конусности и т.п.).

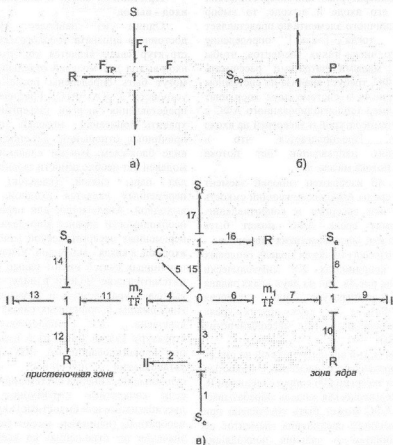


Рис.3. Топологоэнергетическая структура связи фонтанирующего слоя

Объединяя с учетом сказанного фрагменты динамика, например, фонтанирующего слоя, то целесообразно учесть это так, как показано на рис.3в, учитывая, кроме того, инерционные и емкостные эффекты с помощью С- и I-элементов. Такая модель может быть использована для расчета процессов преобразования энергии, потерь и динамики устройства КА ФТС [1, 3, 24].

С-элемент на топологоэнергетической структуре характеризует способность слоя накапливать энергию (эксергию), параметр которого есть емкость аппарата (или слоя) по газу. Элемент  $R_{16}$  отражает эффект газопроницаемости слоя дисперсного материала в режиме развитого фонтанирования. Выход энергии (эксергии) из слоя вместе с газовым потоком учитывается  $S_{f17}$ -элементом.

Использование топологоэнергетических структур связи без I и С-элементов позволит получить статические и эксергодиссипативные модели, которые могут быть использованы для расчета эффективности ФТС в установившихся режимах работы.

Если мы знаем или предполагаем, что существенное значение имеет внутренняя

динамика, например, фонтанирующего слоя, то целесообразно учесть это так, как показано на рис.3в, учитывая, кроме того, инерционные и емкостные эффекты с помощью С- и I-элементов. Такая модель может быть использована для расчета процессов преобразования энергии, потерь и динамики устройства КА ФТС [1, 3, 24].

Рассматриваемый подход применим к устройствам и обрабатываемым средам КА ФТС и область его применения определяется только ограничениями, накладываемыми самой моделью. Полученный таким образом ряд моделей устройств и обрабатываемых сред КА ФТС можно упорядочить и запомнить на бумаге или в ЭВМ, а в случае возникновения конкретного вопроса при проектировании можно найти подходящую модель.

#### Геометрическая детализация

Другой тип проблем возникает в связи с геометрией устройств. Например, если исследуются переходные тепловые процессы в аппарате фонтанирующего слоя (АФС) при

изменении температурных или эксергетических условий на его входе и выходе, то выбор типового единичного элемента не представляет трудности, тогда как определение необходимого числа таких элементов, чтобы точно и с малыми затратами рассчитать поведение АФС, требует анализа на системном уровне. На рис.4а в системе двух координат приведен пример теплоизолированного АФС с переменной температурой и эксергией на входе и выходе. Предполагается, что в горизонтальном направлении нет потока теплоты  $Q$  и потока массы  $m$ .

На рис. 4б изображен типовой элемент проводящей среды АФС, включающий емкость по теплоте или эксергии и сопротивление. Обработываемая среда АФС может быть представлена кн массивом таких элементов.

Топологоэксергетическая модель тепловых условий в координатах ХУ символически изображена на рис.4в, где на двух краях задана переменная температура или эксергия (источники Se), а на двух других краях нулевой тепловой поток или массовый поток (источники Sf).

При этом  $(i, j)$ -й элемент показан на рис.4г в виде четырехсвязного элемента с емкостью по теплу или эксергии  $C$  и сопротивлениями  $R$ . Топологоэксергетическая модель обрабатываемой среды АФС может быть составлена при помощи каскадного соединения элементов по двум координатам и задания подходящих граничных условий на краевых связях, которые определяются согласно методике [2]. Возможными переменными состояниями являются кн переменных  $T_{i,j}$  или  $e_{i,j}$ .

Из этого примера следует сделать вывод, что типичный процесс создания модели дифференциального уравнения в частных производных и последующей дискретизации его посредством метода конечных разностей с успехом можно заменить эквивалентным процессом построения многосвязной топологоэксергетической модели типового единичного элемента (модуля) и объединения этих элементов (модулей) для представления компонентов. Одним из преимуществ использования последней процедуры является то, что модели отдельных элементов могут быть выражены затем в структурной форме, непосредственно совместимой с моделями устройств КА ФТС. Наличие единой базы данных в топологоэксергетической форме в значительной мере способствует автоматизированной обработке имеющейся в модели информации при системном проектировании.

### Причинные связи и анализ отношений вход - выход

Одним из наиболее существенных достоинств аппарата топологоэксергетических структур связи является то, что отношение вход-выход для моделей отдельных устройств могут быть определены после объединения устройств в КА ФТС. Графическая форма представления энергии (эксергии) позволяет хранить описания моделей не в виде причинных отношений, а непосредственно в виде блок-схем. Иными словами, для таких моделей нет необходимости заранее определять для пары связей (каналов), какая из переменных является входной, а какая - выходной. Аналогично, для пары связей нет необходимости заранее определять, какая из переменных эксергетической мощности будет входной, а какая - выходной. Усилия по выбору причинных связей имеют целью организовать математические модели в виде, удобном для вывода уравнений и расчетов [9-19]. Информация о причинных связях может быть включена в топологоэксергетическую структуру связей (рис.3,в) в нужный момент при проектировании КА ФТС [14-19]. При установлении причинных связей не существенно, линейна система или нет. Однако если конкретные структурные (например, диссипативные или емкостные) характеристики необратимы (например, имеют фиксированное значение по отношению ко всем вариантам выбора причинных связей), то конкретный выбор причинных связей может облегчить или, наоборот, затруднить вычисления.

Так как для нелинейных систем большой размерности процесс анализа модели и составления уравнений связи, как правило, представляет собой сложную и дорогостоящую задачу, то и количество операций при анализе причинности в топологоэксергетических структурах связей значительно. Нецелесообразно приступать к решению уравнений до тех пор, пока эти уравнения не будут приведены к удобному для использования виду, а вся конфигурация системы не будет системно организована.

Имеется достаточно много примеров [1-5,14-19], показывающих использование топологоэксергетических структур связей для анализа технических устройств и ФТС.

Для первоначального знакомства с некоторыми применениями такого моделирования рекомендуем статьи [6, 12, 13, 18, 19], где содержится точное определение языка топологоэксергетических структур связей.

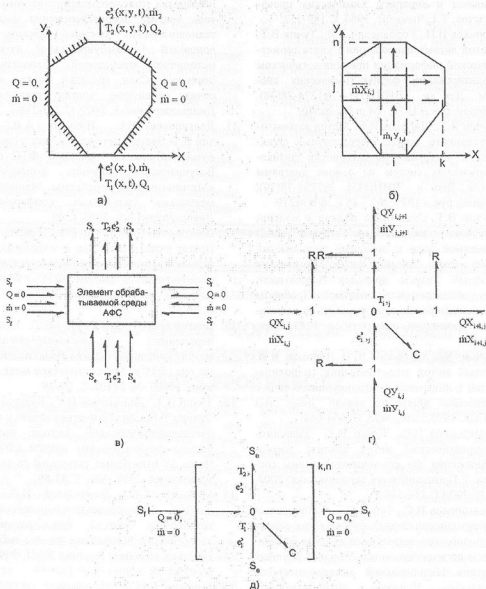


Рис.4. Иллюстрация геометрической детализации обрабатываемой среды АФС

Подробности организации причинных отношений в топологоексергетических структурах связей, составления уравнений состояния и моделирования ФТС можно найти в работах [14-19].

#### Выводы

Основными преимуществами использования топологоексергетических структур связей в качестве единой базы данных при проектировании КА ФТС являются:

1. Широкий класс областей проектирования энергетических (ексергетических) структур, которые может системно обеспечить база данных.

2. Наглядность и компактность представления структурной информации о моделях КА ФТС.
3. Эффективность представления, поиска и моделирования КА ФТС с использованием топологоексергетических структур связей.

#### Литература

1. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л. и др. Системный подход к моделированию массообменных процессов разложения карбоната свинца в аппарате фонтанирующего слоя // Материалы второй Всесоюзной научной конференции «Современные

- машины и аппараты химических производств», Т.1, Чимкент, 1980, С.149-152.
2. Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л., Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем. Деп. в ВИНТИ. №1274-78(78). «Депон. рук.» 1978, -24 с. б/о №540.
  3. Тучин В.Т., Дорохов И.Н. Метод автоматизированного вывода передаточных функций и частотных характеристик физико-химических систем на основе диаграмм связи. Деп. в ВИНТИ. №3296-78(79). «Депон.рук.» 1979, №2 - 25 с., б/о №219.
  4. Тучин В.Т. Системный подход к моделированию газодинамики верхней зоны доменной печи с помощью топологического метода описания физико-химических систем// Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Проблемы автоматизированного управления доменным производством», октябрь, 1983, Киев, С.15.
  5. Тучин В.Т., Кафаров В.В.,Дорохов И.Н. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи// Докл. АН СССР, 1979,т.244, №23. С. 664-668.
  6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Тополого-эксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // Промышленная теплотехника. 2003, т.25, №24,С.116-118.
  7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа топологоэксергетического анализа физико-технологических систем. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск: НМетАУ, т.5, 2002,С.67-71.
  8. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии. Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. - Днепропетровск: НМетАУ, 2001, т.4, С.20-26.
  9. Братута Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах.// Интегровані технології та енергозбереження.-2003, 4.-С. 20-27.
  10. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем// Збірник тез доповідей 4-ї Всеукраїнської науково-методичної конференції "Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій", Дніпродзержинськ, 2002, С.235-236.
  11. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС // III Всеукраинская научная конференция «Математические проблемы технической механики» (материалы конференции). Днепродзержинск, 2003. С 49.
  12. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Шрамко О.А. Новые узлы разделения в топологоэксергетическом методе моделирования физико-технологических систем (ФТС)// Математическое моделирование.-2003.-№ 1(9).-С. 56-60.
  13. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Система переменных в топологоэксергетическом методе описания физико-технологических систем (ФТС)// Математическое моделирование.-2003.-№ 2 (10).-С. 73-78.
  14. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС) - Часть 1// Интегровані технології та енергозбереження.-2004.-№4.- С.81-89.
  15. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Использование тополого-эксергетического метода для разработки экологически безопасных физико-технологических систем.// Вестник ХПИ, 2004, № 38.-С.53-58.
  16. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический анализ сушильной камеры трубы-сушилки (стационарный режим)// Математичне моделювання.- 2004, №2 (12). - С.55-61.
  17. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Словицкий П.А., Хандрига Г.С. Топологоэксергетический анализ рекуперативного пластинчатого теплообменника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины - Днепропетровск: «Пороги», том 10, 2004.- С.183-194.
  18. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В., Шрамко О.А., Тучина У.Н. Разработка новых элементов метода диаграмм связи для моделирования



- физико-технологических систем// Энергетика: економіка, технології, екологія.-2004, №1.- С.37-41.
19. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Элементарная база топологоэнергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС)// Математичне моделювання - 2005. - №1(13). С. 1-8.
20. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. - М.: Наука, 1976.- 500с.
21. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации.- М.: Наука, 1979.- 394с.
22. Karnopp D., Rosenberg R. System Dynamics: A Unified Approach. N.Y., John Wiley Inc., 1974. 402 p.
23. Кичигин А.Ф., Егер Д.А.. Канонические ансамбли в процессах интенсификации добычи нефти. - Київ.: Техніка , 2002.- 182 с.
24. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Кафаров В.В., Горбацевич Л.Л. Синтез математического описания элементов систем автоматизированного управления методом диаграмм святы// Известия АН Армянской ССР, серия технических наук. - 1978.-т.XXXI, №6.-С.47-54.