

Метод диаграмм связи при моделировании гидродинамики выпуска металла из конвертера. Особенности построения топологических структур связи и актуальность применения их в металлургии (сообщение 1)

В. Т. ТУЧИН*, А. Д. КУЛИК, А. П. ОГУРЦОВ, И. С. ДОЛГОПОЛОВ, А. А. ПОХВАЛИТЫЙ

Днепродзержинский государственный технический университет
*ЧАО «Минудобрения»

В данной работе выполнено совершенствование метода топологических структур связи для моделирования физико-технологических систем со сложной структурой. Показаны возможности применения метода в различных областях знаний

У даній роботі виконано вдосконалення методу топологічних структур зв'язку для моделювання фізико-технологічних систем зі складною структурою. Показані можливості застосування методу в різних галузях знань

This paper presents the improvement of the method of topological structures of communication to model the physical and technological systems with a complex structure. Are shown possibilities of use of a method in various fields of knowledge

Введение. Получение математической модели того или иного технологического процесса является одной из важных задач выполняемых исследований. При описании гидродинамических, тепло- и массообменных процессов в металлургии наиболее широкое применение получили математические методы исследования сложных физических систем [2-10], которые используют численные методы решения. В данной работе делается попытка использовать методологию [2-9] топологических структур связи (диаграмм связи) для описания одного из звеньев металлургической технологии – истечения металла из конвертера.

Выпускная летка любого сталеплавильного агрегата является очень важным его узлом, от надежности, технологических и геометрических параметров которого во многом зависят результаты производства стали. Выпускной канал конвертера является узлом, функции которого в последние десятилетия расширены в связи с проблемой отсечки печных шлаков. Вместе с тем, для конвертерной технологии обостряется проблема увеличения рафинировочного потенциала, который уже на стадии выпуска определяет и качество, и экономику технологии [1]. При этом становятся актуальными решения вопросов связанных с созданием как автономных моделей гидродинамики, тепло- и массообмена, так и их совмещенных моделей.

Постановка задачи. Целью работы является:

1. Дальнейшее усовершенствование метода топологических структур связи для моделирования физико-технологических систем (ФТС) со сложной структурой различных устройств с последующим определением их конструктивно-технологических параметров.

2. Расширение сферы применения топологического подхода в форме диаграмм связи (ДС) для математического моделирования физико-технологических систем (ФТС) со сложной структурой, к которым относятся металлургические системы, в частности, конвертерный передел чугуна в сталь, где в качестве объекта моделирования рассматривается его заключительное звено – выпуск металла из конвертера.

Методика решения. При реализации гидродинамики технологии выпуска металла из конвертера значительную помощь могут оказывать математические

модели, позволяющие определять их параметрические и энергетические характеристики, снижая до минимума и даже исключая экспериментальные исследования. Кроме того, для создания эффективных систем выпуска металла из конвертера через выпускные летки необходимо иметь математические описания, позволяющие с позиций системного анализа отразить гидродинамические, тепло- и массообменные, химические и механические процессы и их взаимосвязи. При изучении каждого из этих процессов используются такие понятия как энергия, мощность, заряд, потенциал, поэтому сложный комплекс рассматриваемых процессов может быть представлен с единых энергетических позиций. При этом аналитическое описание может быть выполнено в виде отдельных модулей, отражающих каждый из указанных выше процессов. Получить математические модели такого вида позволит метод диаграмм связей (топологических структур связей) [2-5]. В статье рассматриваются результаты получения модулей, представляющих математические модели гидродинамических процессов, протекающих в системах выпуска металла через выпускные летки различных конструкций из конвертеров, с помощью диаграмм связей (топологических структур связей). Эти модули в дальнейшем могут быть использованы для изучения особенностей взаимодействия металла с газом при исследовании процессов рафинирования.

Определение понятия физико-технологической системы (ФТС).

В различных областях науки и техники для описания поведения физических и инженерных систем находят применение прикладные методы комбинаторной топологии и теории структурных графов. Сравнительно недавно появились попытки применить топологические методы, основанные на теории связанных графов, для описания механических, термодинамических и металлургических процессов [2-8]. В этих случаях с позиций системного анализа отдельный металлургический процесс технологии рассматривается как сложная кибернетическая система, определяемая как **физико-технологическая система (ФТС).**

Физико-технологическая система (ФТС) - объект, обладающий сложным внутренним строением,

большим числом составных частей и элементов (самостоятельных и условно неделимых единиц), взаимодействующих между собой и окружающей средой, между которыми существуют материальные, энергетические, экономические и информационные связи, при этом взаимодействующие среды распределены в пространстве, переменны во времени и имеют источники (стоки) материальных, энергетических, финансовых и информационных ресурсов.

Диаграмм связной подход основан на структурном представлении ФТС, вытекающем из разложения обобщенной диссипативной функции системы [2-8] на обобщенные переменные усилия – e_i и переменные потока – f_i (см. табл. 1). Известно, что энергия (мощность) пропорциональна произведению движущей силы на поток $P_i = e_i f_i$, где e_i – движущая сила i -го необратимого процесса в системе, f_i – соответствующий термодинамический поток. При этом реализуется формализация процедур формирования математических моделей технологических процессов, отражающих их энергетическую сторону функционирования, в рамках топологического метода описания ФТС [2-8] при решении задач моделирования.

Формализм графов связи и качественное обоснование анализа ФТС

Графы связи – это инструмент параметрического моделирования, обеспечивающий унифицированный подход к анализу и синтезу динамических систем, главным образом гибридных многосвязанных (многодоменных) систем, включая механические, электрические, пневматические, химические и гидравлические системы [2-8].

1. Аксиоматика топологических структур связи (ТСС)

1.1. Топологическая структура связи состоит из трех основных компонентов:

1.1.1 *Связей* [5-7], по которым передаются потоки энергии. Направление передачи изображается половиной стрелки – \longrightarrow

Полная стрелка является признаком активной связи, используемой для изображения операций измерения и управления – \longleftrightarrow

1.1.2 *Структур слияния и разделения потоков* [6], отражающих специфическую сторону ФТС – характер совмещенности в данной точке или объеме энергетических явлений и процессов различной физико-химической природы: гидромеханической, химической, диффузионной, тепловой и т.д. (см. табл. 2).

1.1.3 *Топологических элементов* [5, 8], характеризующихся математическими зависимостями между энергетическими e_i - и f_i - переменными в виде алгебраических, дифференциальных и интегральных уравнений (см. табл. 3). Связи переменных состояний и характеристических соотношений («тетраэдр состояний» Пэйнтера) представлены на рис. 1.

1.2 Смысловая нагрузка топологической связи информационно усиливается заданием причинно-следственных отношений с помощью штриха причинности и путем задания направления потока (постулируется правило знаков):

$$e \xrightarrow{\quad} \infty \quad \dashrightarrow \quad ; \quad e \xleftarrow{\quad} \infty \quad \dashleftarrow \quad \\ f \xleftarrow{\quad} \infty \quad \dashleftarrow \quad ; \quad f \xrightarrow{\quad} \infty \quad \dashrightarrow \quad$$

Графы связи объединяют графические представления, математические уравнения и состоят из переменных, элементов и конститутивных зависимостей (определяющих зависимостей). Таблица 1 показывает граф связные переменные усилие (e), поток (f), перемещение (q), момент (p), мощность (P) и энергия (E) механических, электрических, гидравлических, термодинамических, экономических и химических ФТС.

Таблица 1. Граф связные переменные в областях механики, электроники, термодинамики, гидравлики, химии и экономики

Переменные	Механика	Электроника	Термодинамика	Гидравлика	Химия	Экономика
Усилие, e	Сила F , (N)	Напряжение u_{Σ} , (V=NM/C)	Температура T , (K)	Давление P , (N/м ²)	Химический потенциал μ , (Jмоль ⁻¹)	Цена единицы продукции $c^{жк}$, (грн/ед.прод.)
Поток, f	Скорость v , (м/с)	Ток i_{Σ} , (A=C/c)	Поток энтропии, \dot{S} , (W·K ⁻¹)	Объёмный расход сети Q , (м ³ /с)	Мольный поток \dot{n} , (моль с ⁻¹)	Поток заказов, товарный поток, $f_{жк}$, (ед.прод./время)
Момент, p	Импульс силы p_F , (N/c)	Потокоцепление Φ , (Vc)		Импульс давления p_P , (Nc/м ²)		Инвестиционный импульс, $p^{жк}$, ((грн/ед.прод.)время)
Перемещение, q	Перемещение L , (м)	Заряд q_{Σ} , (C=Ac)	Энтропия S , (J·K ⁻¹)	Объём V , (м ³)	Число молей, n	Заказ, $q^{жк}$, (ед.прод.)
Мощность, P	P_M , (Nm/c)	P_{Σ} , (VA= =W= NM/c)	P_T , (W)	P_G , (Nm/c)	P_X , (Jc ⁻¹)	Денежный поток, $P_{жк}$, (грн/время)
Энергия, E	E_M , (Nm=J)	E_{Σ} , (J=VAc= =Wc=NM)	E_T , (J)	E_G , (Nm=J)	E_X , (J)	Денежная сумма, $E_{жк}$, (грн)

Графы связи могут быть использованы для отображения общей передачи энергии или преобразований

лежащих в основе различных физических полей ФТС в унифицированной системе обозначений.

Характеристики графов связи включают способности к:

- установлению взаимосвязей между системой, подсистемами и элементами;
- получению качественной физической информации как концептуальной модели;
- представлению топологии подсистем или элементов различных физических областей, так же как представлению взаимосвязи их продуктов;
- представлению динамики систем;

- гибкости и эластичности.

Качественное обоснование анализа ФТС связано с качеством значений для переменных и взаимосвязей. Это может использоваться для создания модели глубокого (энергетического) уровня знаний для представления взаимосвязей между структурой системы и её поведением без необходимости управления явно заданными знаниями лежащих в основе законов физики.

Таблица 2. Типы структур слияния и разделения

Типы структур слияния и разделения потоков	Топологический символ	Определяющие соотношения
1	2	3
Параллельное соединение (0-структура)		$\sum_i^n \alpha_{ni} f_{ni} + \sum_i^m \alpha_{oi} f_{oi} = 0$ $e_{n1} = e_{n2} = \dots = e_{nm} = e$ $e_{o1} = e_{o2} = \dots = e_{om} = e$
Последовательное соединение (1-структура)		$\sum_i^n \alpha_{ni} e_{ni} + \sum_i^m \alpha_{oi} e_{oi} = 0$ $f_{n1} = f_{n2} = \dots = f_{nm} = f$ $f_{o1} = f_{o2} = \dots = f_{om} = f$

Исследования при качественном анализе связано с построением параметрической модели и проблемами имитационного моделирования. Последние моделируют или анализируют модель, делая явными некоторые факты о мире, которые неявны в том описании мира.

Эффективная качественная модель должна обладать следующими возможностями:

- подробным описанием местоположения системы компонентов и их взаимосвязей;
- простым описанием связей между входом и выходом системы;
- соответствующим представлением через области сложных динамических систем с унифицированной структурой, которые должны систематически реализовываться с использованием формального языка моделирования;
- интегрированием качественных представлений и количественной информации;
- преодолением трудностей качественных производных высшего порядка.

Графы связи для ФТС со сложной структурой (MBG).

В MBG, энергия и перемещение (заряд) определены в широком смысле [8, 9]. У энергии есть способность или сила (мощность) сделать, или достигнуть чего-то. Например, для случая в области экономики деньги представляют энергию, так как деньги - источник силы (мощности) для покупки и имеют возможность приложить усилия к экономической деятельности. Перемещение вызвано изменением энергией. Изменения в различных областях может так же быть различными явлениями, такими как перемещение в механике,

заряда в электронике, объёма в гидравлике и заказа в экономике. Базирующиеся на выше приведенных определениях и подчинении (исполнении) конститутивным зависимостям другие MBG переменные, включая усилие (**e**), поток (**f**), момент (**p**), определяются следующим образом:

- усилие, **e**, является количеством энергии, которая необходима для единицы заряда (изменения) и является единицей энергии. Оно равно *энергия/заряд*;
- поток, **f**, является количество заряда (изменений), которые происходят в единицу времени. Он равен *заряд/время*;

- момент, **p**, является количеством энергии, которая необходима за период времени для единицы заряда. Он равен *(энергия × время)/заряд* и так же равен интегралу по времени от усилия (1);

$$p = (\text{энергия} \times \text{время})/\text{заряд} = \int e dt \quad (1)$$

- перемещение, **q**, определяется как заряд (изменение). Он равен интегралу по времени от потока (2)

$$q = \int f dt \quad (2)$$

- мощность, **P**, равна произведению потока на усилие и так же равна дифференциалу по времени от энергии (3)

$$P = e \cdot f = \dot{E} = \text{энергия/время} \quad (3)$$

Далее, **I**, **C**, **R** и **M**– элементы MBG развиты следующим образом, подчиняясь конститутивным зависимостям:

- I** – элемент является единицей потока, который может вызвать или сохранить количество энергии за период времени равный импульсу по потоку (4).

$$I = p / f = \frac{\frac{\text{энергия} \times \text{время}}{\text{заряд}}}{\frac{\text{заряд}}{\text{время}}} = \frac{\text{энергия} \times \text{время}^2}{\text{заряд}^2} \quad (4)$$

2. **C** - элемент является единицей усилия, который может вызвать или сохранить количество зарядов. Он равен заряду по усилию (5).

$$C = q / e = \frac{\frac{\text{заряд}}{\text{энергия}}}{\text{заряд}} = \frac{\text{заряд}^2}{\text{энергия}} \quad (5)$$

3. **R** - элемент является единицей энергии необходимой или диссипированной для единицы потока (6).

$$R = e / f = \frac{\frac{\text{энергия}}{\text{заряд}}}{\frac{\text{заряд}}{\text{время}}} = \frac{\text{энергия} \times \text{время}}{\text{заряд}^2} \quad (6)$$

4. **M** - элемент, «запоминающий» резистор, так как он «запоминает» оба интеграла потока и полного приложенного усилия.

$$\frac{dp}{dt} = M(q) \frac{dq}{dt} \Rightarrow e = M(\int f dt) f \quad (7)$$

а) Используя «тетраэдр состояний» получаем: $eC = q$, при этом $p = Mq$, $a q = M^{-1}p$, где $p = \int edt + e(0)$, $eC = M^{-1}p$, $eC = M^{-1}[\int edt + e(0)]$, тогда

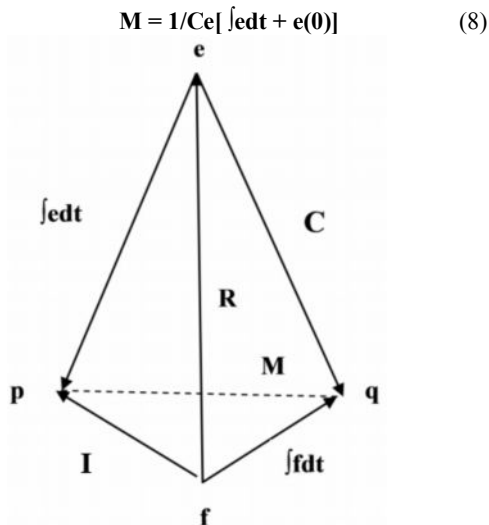


Рис. 1. Связи переменных состояний их характеристических соотношений («тетраэдр состояний» Пэйнтера [8])

б) Для $q = f(0) + \int f dt$, $p = I \cdot f$, $p = Mq$, $I \cdot f = M[f(0) + \int f dt]$,

$$M = I \cdot f / [f(0) + \int f dt] \quad (9)$$

в) Для $q = f(0) + \int f dt$, $eC = q$, $p = I \cdot f$, $p = \int edt + e(0)$, $p = Mq$,

$$M = p/q = I \cdot f / Ce = [\int edt + e(0)] / [f(0) + \int f dt] \quad (10)$$

г) Для $e = E / q$, $f = q / t$, $p = E \cdot t / q$, $p = \int edt + e(0) = E(0) / q(0) + \int (E / q) dt$, $q = f t$,

$$M = Et / qft = E / qf = Et / q^2, \quad (11)$$

кроме того $M = I \cdot f / Ce = (Et^2 \cdot Eq^2) / (q^4 \cdot t \cdot E) = (E \cdot t) / q^2$
В дальнейшем по пунктам (а, б, в, г) будут разработаны алгоритмы получения мемристора различными путями.

В графах связи два вида узлов: **0** – узлы и **1** – узлы:

5. **0** – узел подобен параллельному узлу. Для **0** – узла, усилия на связях связанных с этим **0** – узлом все равны и сумма всех связанных потоков равна нулю (12)

$$\sum f = \sum \frac{\text{заряд}}{\text{время}} = 0 \quad (12)$$

6. **1** – узел подобен последовательному узлу. Для **1** – узла, потоки на связях связанных с этим **1** – узлом все равны и сумма всех связанных усилий равна нулю (13)

$$\sum e = \sum \frac{\text{энергия}}{\text{заряд}} = 0 \quad (13)$$

В таблице 3 показаны переменные, элементы и узлы MBG с их математическими зависимостями. MBG переменные и MBG элементы могут быть применены для графического представления и математических уравнений при моделировании передачи энергии и преобразования в многосвязанных областях.

Таблица 3. Переменные, элементы и узлы MBG

MBG переменная	MBG элемент
Усилие, e энергия/заряд	I – элемент энергия×время ² /заряд ² , ($I = p/f$)
Поток, f заряд/время	C – элемент заряд ² /энергия, ($C = q/e$)
Момент, p энергия × время/заряд	R – элемент энергия×время/заряд ² , ($R = e/f$)
Заряд (перемещение), заряд	0 – узел $e_1 = e_2 = \dots = e_n, n \in \mathbb{N}$ $\sum f = \sum \text{заряд}/\text{время} = 0$
Мощность, P энергия/время ($P = e \cdot f = \text{энергия}/\text{заряд} \times \text{заряд}/\text{время}$)	1 – узел $f_1 = f_2 = \dots = f_n, n \in \mathbb{N}$ $\sum e = \sum \text{энергия}/\text{заряд} = 0$
Энергия, E энергия	

Выводы

1. Представлены графы связи для ФТС со сложной структурой (MBG).

2. Показана дальнейшая разработка диаграммного метода описания ФТС, совмещающего наглядность и простоту их структурного представления.

ЛИТЕРАТУРА

- Кулик А. Д., Кашеев М. А., Похвалитый А. А. Совершенствование выпуска стали из конвертера // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2013. — №1. — С. 18—20.
- Системный подход к моделированию гидродинамических процессов при нанесении шла-

- кового гарнисажа на футеровку кислородного конвертера (топологический метод). Методика получения модели / Т. Р. Галиуллин, В. Т. Тучин, А. Г. Чернятевич и др. // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. — 2008. — № 10. С. 14—21.
3. Системный подход к моделированию гидрогазодинамических процессов при нанесении шлакового гарнисажа на футеровку кислородного конвертера (топологический метод). Анализ результатов моделирования. Известия высших учебных заведений / Т. Р. Галиуллин, В. Т. Тучин, А. Г. Чернятевич и др. // Чёрная металлургия. — 2008. — №12. — С.21—26.
 4. Hydrogas-dynamic processing slag-coating application to the oxygen-converter lining: A topological approach to simulation. / T. R. Galiullin, V. T. Tuchin, A. G. Chernyatevich etc. // Journal Steel in Translation. v.38. — 2008. — №10. — P. 800—806.
 5. Основы формализма топологоэнергетического метода моделирования физико-технологических систем / В. Т. Тучин, И. С. Долгополов // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки) / Днепродзержинск : ДДТУ. — 2006. — С. 202—213 с.
 6. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации. — М. : Наука. — 1979. — 394 с.
 7. Rosenberg R. C., Karnopp D. C. Introduction to Physical System Dynamic. — New York : McGraw-Hill Inc. 1983. — 420 p.
 8. Мемристорный элемент метода графов связи применительно к описанию физико-технологических систем (ФТС). Часть 1,2 / В. Т. Тучин, И. С. Долгополов, А. В. Садовой, Н. Т. Тищенко // Сборник научных статей XXI Международной научно-практической конференции «Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов» / УкрГНТЦ «Энергосталь». — Харьков : Райдер. — 2013. — Том 2. — С.242—251.
 9. Развитие научных основ энерго-ресурсосбережения физико-технологических систем (стратегия и тактика системного подхода к проблеме энергоресурсосбережения). Часть 1,2 / В. Т. Тучин, И. С. Долгополов, А. В. Садовой, Н. Т. Тищенко // IX Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення» : Зб. наук. ст. / УкрНДІЕП.-Х. : Райдер. — 2013. — Том 2. — С. 265—275.
 10. Азаров В. Л., Лупичев Л. Н., Тавризов Г. А. Математические методы исследования сложных физических систем. М. : Наука. — 1975. — 342 с.