

## 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,



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)		$\sum_i^n \alpha_{ni} f_{ni} + \sum_i^m \alpha_{oi} f_{oi} = 0$ $e_{n1} = e_{n2} = \dots = e_{nm} =$ $e_{o1} = e_{o2} = \dots = e_{om} = e$
Последовательное соединение (1-структура)		$\sum_i^n \alpha_{ni} e_{ni} + \sum_i^m \alpha_{oi} e_{oi} = 0$ $f_{n1} = f_{n2} = \dots = f_{nm} =$ $f_{o1} = f_{o2} = \dots = f_{om} = f$

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:

1. **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).

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

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

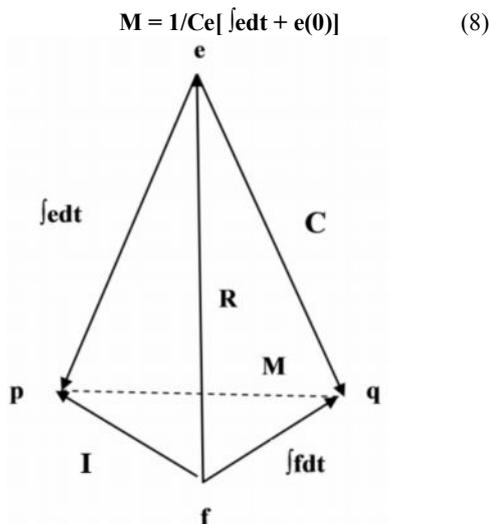


Рис. 1. Связи переменных состояний ихарактеристических соотношений («тетраэдр состояний» Пэйнтера [8])

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  $M = I \cdot f / Ce = (Et^2 \cdot Eq^2) / (q^4 t E) = (E \cdot t) / q^2$   
 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	<b>I</b> – элемент энергия×время <sup>2</sup> /заряд <sup>2</sup> , (I = p/f)
Поток, f заряд/время	<b>C</b> – элемент заряд <sup>2</sup> /энергия, (C = q/e)
Момент, p энергия × время/заряд	<b>R</b> – элемент энергия×время/заряд <sup>2</sup> , (R = e/f)
Заряд (перемещение), заряд	<b>0</b> – узел e <sub>1</sub> = e <sub>2</sub> = ... = e <sub>n</sub> , n ∈ N Σf = Σзаряд/время = 0
Мощность, P энергия/время (P = e·f = энергия/заряд × заряд/время)	<b>1</b> – узел f <sub>1</sub> = f <sub>2</sub> = ... = f <sub>n</sub> , n ∈ N Σe = Σэнергия/заряд = 0
Энергия, E энергия	

### Выводы

1. Представлены графы связи для ФТС со сложной структурой (MBG).
2. Показана дальнейшая разработка диаграммно-го метода описания ФТС, совмещающего наглядность и простоту их структурного представления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Кулик А. Д., Кашеев М. А., Похвалитый А. А. Совершенствование выпуска стали из конвертера // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2013. — №1. — С. 18—20.
2. 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.