

- / J.F. Buford, H. Yu, Eng Keong Lua; Elsevier Inc.— USA: 2009. — 396 p.
4. Васильев Д.С. Экспериментальное исследование качества передачи видео в древовидной P2P сети с алгоритмом ARQ прикладного уровня / Д.С. Васильев, А.В. Чунаев, А.В. Абилов // Т-Comm Телекоммуникации и транспорт, Том 8, № 1. — 2014. — С. 10-15.
 5. Васильев Д.С. Разработка алгоритмов передачи потоковых данных на прикладном уровне в сетях беспилотных летательных аппаратов.: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.12.13 „Системы, сети и устройства телекоммуникаций” / Васильев Д.С. — Ижевск, 2013. — 18 с.
 6. Маклаков С.В. BPWin и ERWin. CASE-средства разработки информационных систем / С.В. Маклаков // М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. — 256 с.
 7. Моделирование и анализ IDEF-технологии: практикум / С.В. Черемных, И.О. Семенов, В.С. Ручкин. — М. Финансы и статистика, 2002. — 192 с.
 8. Аксенов К.А. Работа с CASE-средствами BPwin, ERwin: учебник / К.А. Аксенов, Б.И. Клебанов — Е.: ГОУ ВПО Уральский государственный технический университет УГТУ-УПИ, 2004. — 50 с.
 9. Фридл Дж. Регулярные выражения, 3-е издание / Дж. Фридл. — СПб.: Символ, 2008. — 598 с.
 10. Солодка Н.А. Применение алгоритма разбора строк в клиент-серверном приложении на основе регулярных выражений / Н.А. Солодка, Г.Г. Книжник // Наукова Україна: Збірник статей II Всеукраїнської наукової конференції (з міжнародною участю) 23-24 травня 2016 року. — Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2016. — С.208-212.

пост. 29.06.2017

А.А. ПОХВАЛИТЫЙ, ассистент кафедры металлургии черных металлов
Е.Н. СИГАРЕВ, д.т.н., зав. кафедрой металлургии черных металлов
А.Д. КУЛИК, к.т.н., доцент
В.П. ПОЛЕТАЕВ, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов
 Днепровский государственный технический университет, г. Каменское

Моделирование выпуска расплава из конвертера с применением метода диаграмм связей

Представлены результаты моделирования выпуска расплава из конвертера в сталеразливочный ковш с применением метода диаграмм связей. Предложена методика получения аналитических моделей с использованием диаграмм связей. Кодовая диаграмма построена с учетом принципа декомпозиции с указанием вида связей между структурными элементами. Разработан модуль функционального оператора гидродинамики движения жидкой фазы в системе «жидкая ванна конвертера — сталевыпускной канал», реализованный средствами Mathcad. Проведено численное исследование гидродинамических процессов в сталевыпускном канале конвертера с учетом изменения его геометрии по ходу кампании.

Постановка проблемы

Совершенствование технологии выпуска расплава с учетом более широкого использования рафинировочного потенциала сталевыпускного узла кислородного конвертера является актуальной задачей. Наличие в системе «жидкая ванна конвертера — сталевыпускной канал» значительного количества взаимосвязанных параметров обуславливает необходимость применения методов математического моделирования [1]. Для решения таких задач в ряде случаев целесообразно использование метода диаграмм связей (ДС) [2].

Анализ последних исследований и публикаций

Особенности организации выпуска расплава через сталевыпускной канал промышленного конвертера в сталеразливочный ковш с одновременной обработкой инертным газом с целью рафинирования и характер истечения жидкости из емкости (холодная модель) с обработкой потока инертным газом описаны в работах [1, 3, 4]. Основные положения использования метода диаграмм связей, базовые понятия и положения теории графов, описание «тетраэдра состояний Пейнтера» и области применения выводимых с его помощью функциональных зависимостей представлены в работе [2]. Инструментарий и методика получения систем уравнений подробно изложены в работе [6].

Необходимо отметить, что полученные результаты отражают только качественную картину влияния ряда технологических параметров на процесс выпуска расплава. Сведения о математическом описании процессов, учитывающем особенности и закономерности функционирования системы «жидкая ванна конвертера — сталевыпускной канал» в доступных литературных источниках отсутствует.

Формулировка цели исследования

Целью работы является разработка математической модели выпуска расплава из конвертера с применением метода диаграммы связей (ДС), с учетом геометрических параметров сталевыпускного канала и ванны конвертера, а также расходных характеристик инертного газа (аргона), вдуваемого в поток для реализации углеродного раскисления стали по способу [1, 5].

Изложение основного материала

В таблице 1 представлена использованная для разработки математической модели символика ДС: типы элементов, отношения для элементов связи, узловые структуры, содержание переменных в соответствии с [2].

Наименования дескрипторов определены в терминах, связанных с энергией и мощностью. Для потоковых систем, к которым относится «жидкая ванна конвертера — сталевыпускной канал» и в которых такая

Таблица 1. Элементы графов связей

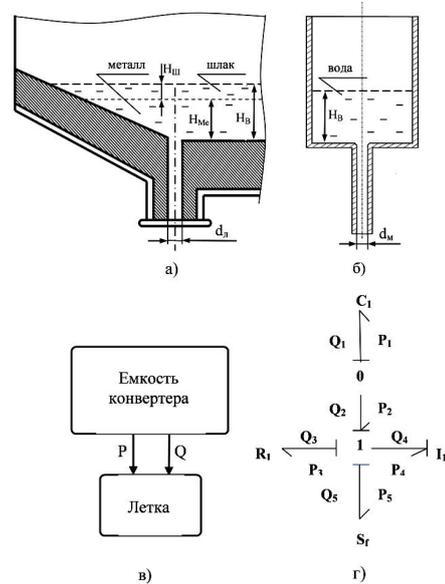
Тип элемента*	Название элемента, символика	Отношения для элементов	
1	Источники Источник усилия $S_e \xrightarrow{e}$	$e = S_e(t)$	
	Источники Источник потока $S_f \xrightarrow{f}$	$f = S_f(t)$	
	Потери Сопротивление $R \xrightarrow{e} \searrow$	$e - Rf = 0$	
	Аккумуляторы энергии	Накапливающий элемент $\xrightarrow{e} C$	$f - C \frac{de}{dt} = 0$
Инерционность $\xrightarrow{e} I$		$e - I \frac{df}{dt} = 0$	
2	Связывающие элементы	Трансформаторы $\xrightarrow{e} TF \xrightarrow{e}$	$f_2 - nf_1 = 0;$ $e_1 - ne_2 = 0$
		Гираторы $\xrightarrow{e} GY \xrightarrow{e}$	$e_1 - gf_2 = 0;$ $e_2 - gf_1 = 0$
	Потери	Взаимное сопротивление $\xrightarrow{e_1} R \xleftarrow{e_2}$	$e_1 - Rf_2 = 0;$ $e_2 - Rf_1 = 0$
	Аккумуляторы энергии	Взаимное накопление $\xrightarrow{e_1} C \xleftarrow{e_2}$	$f_1 - C \frac{de_2}{dt} = 0;$ $f_2 - C \frac{de_1}{dt} = 0$
		Взаимная инерционность $\xrightarrow{e_1} I \xleftarrow{e_2}$	$e_1 - I \frac{df_2}{dt} = 0;$ $e_2 - I \frac{df_1}{dt} = 0$
	3	Узлы	Нулевой узел $\xrightarrow{e_1} 0 \xleftarrow{e_2} \xleftarrow{e_3}$
Единичный узел $\xrightarrow{e_1} 1 \xleftarrow{e_2} \xleftarrow{e_3}$			$e_1 + e_2 - e_3 = 0;$ $f_1 = f_2 = f_3$
Потери		Поле сопротивления $\xrightarrow{e} R \xleftarrow{f}$	$e - Rf = 0;$ $R = R^t$
Аккумуляторы энергии		Накапливающее поле $\xrightarrow{e} C \xleftarrow{f}$	$f - C \frac{de}{dt} = 0;$ $C = C^t$
	Инерционное поле $\xrightarrow{e} I \xleftarrow{f}$	$e - I \frac{df}{dt} = 0;$ $I = I^t$	

*1, 2, 3 — одно-, двух- и многосвязные элементы соответственно

характеристика, как мощность потока, задается в виде произведения давления на объемный поток, возможно использование следующих интерпретаций переменных: усилие e интерпретируется как давление; поток f — как объемный расход; момент p — как импульс давления; перемещение q — как объем.

В данной работе основные элементы графа связей получили следующие интерпретации: S_e — как источник давления; S_f — как источник объемного расхода; R — как эффекты потерь; C — как накопление жидкости или резервуарные эффекты (аккумуляция напора); I — как инерционные эффекты вязкости; TF — как множество полусвязей с общим давлением; GY — как множество полусвязей, имеющих общий объемный расход (последовательные соединения).

Основными объектами моделирования являлись большегрузный (260-т) кислородный конвертер в положении выпуска металла (рис. 1, а) и емкость с жидкостью и каналом для ее выпуска (холодная модель) (рис. 1, б).



Цифры у элементов — номера полусвязей

Рис. 1. Схемы процесса истечения расплава из кислородного конвертера через сталевыпускной канал (а) и жидкости из емкости низкотемпературной модели (б), кодовой диаграммы (в) и диаграммы связей системы (г)

В соответствии с результатами работ [3—5] к основным контролируемым переменным относили: глубину расплава металла в конвертере (либо жидкой фазы в емкости), шлака или слоя «металл-шлак», интенсивность истечения расплава через сталевыпускной канал, геометрию канала и т.п.

Предложенная кодовая диаграмма гидродинамики истечения жидкой фазы представлена на рис. 1, в без учета приемного устройства (сталеразливочного ковша или его модели). Связь между подсистемами и направленность гидродинамических процессов отражена сплошными линиями со стрелками (рис. 1, в).

Кодовая диаграмма построена с учетом принципа декомпозиции, т.е. расчленения исследуемого объекта на отдельные структуры (элементы) с указанием вида связей между ними. На рис. 1, г представлена диаграмма связей для системы «жидкая ванна конвертера — летка» с соблюдением правил построения ДС [2, 3].

Ограничения и допущения, принятые при построении математической модели:

- жидкая среда в емкости и сталевыпускном канале 260-т кислородного конвертера представлена как объект с сосредоточенными параметрами;
- гидромеханическая сторона процессов истечения жидкой фазы из сталевыпускного канала рассматривается при изотермических условиях;
- объемные расходы через поперечные сечения канала и давления представлены усредненными величинами в полях скоростей и давления потока.

Для системы «жидкая ванна конвертера — сталевыпускной канал (летка)» с помощью диаграммы связей и применением процедуры по методике [2, 6], после соответствующих преобразований получены уравнения, описывающие гидродинамику процессов:

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = -\frac{Q_4}{A_1} \\ \frac{dQ_4}{dt} = \frac{S_1}{\rho l_1} \cdot \left(\rho g(h_1 + l_1) - \sum \xi \cdot \frac{\rho}{2S_1^2} Q_4 |Q_4| \right) \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_4 — объемный расход жидкой фазы через канал, m^3/c ; A_1 — площадь поверхности расплава в конвертере в положении выпуска, m^2 ; h_1 — уровень расплава в конвертере, m ; ρ — плотность расплава, kg/m^3 ; g — ускорение свободного падения, m/c^2 ; l_1 — длина канала, m ; d_1 — внутренний диаметр канала, m ; S_1 — площадь сечения канала, m^2 ; $\sum \xi$ — суммарный коэффициент местных сопротивлений.

Так как поток жидкой фазы имеет неустановившийся характер по причине относительно малой длины сталевыпускного канала, определение суммарного коэффициента местных сопротивлений проводили эмпирическим путем. Для однокамерной летки $\sum \xi = 0,96 \div 1,05$, для двухкамерной [4] — $\sum \xi = 0,50 \div 0,65$ соответственно. При подаче газа в полость летки в режимах, описанных в работе [4], коэффициент $\sum \xi$ находится в пределах $0,80 \dots 1,25$ и зависит от геометрических параметров выпускного канала.

Разработан модуль функционального оператора гидродинамики движения жидкой фазы в системе «жидкая ванна конвертера — летка», который реализован в оболочке Mathcad.

Для проверки адекватности предложенной модели было выполнено численное исследование выпуска жидкой фазы объемом $0,2 m^3$ через модель летки, в соответствии с [1], при переменных параметрах сталевыпускного канала.

На рис. 2, а представлено изменение расхода жидкости при условной длительности выпуска плавки через стандартную летку длиной $0,4 m$ (для низкотемпературной модели).

В соответствии с полученными в ходе низкотемпературного моделирования данными [1], по мере снижения в емкости уровня жидкости расход последней (в

исследованном интервале) снижается приблизительно на 30 %.

Так как по ходу кампании конвертера по футеровке её толщина постепенно уменьшается, то целесообразно оценить влияние изменения длины сталевыпускного канала на длительность выпуска расплава в сталеразливочный ковш (рис. 2, б). Из анализа результатов численного моделирования на рис. 2, б видно, что длина летки оказывает существенное влияние на длительность выпуска и способна привести к изменению продолжительности операции на 40 %.

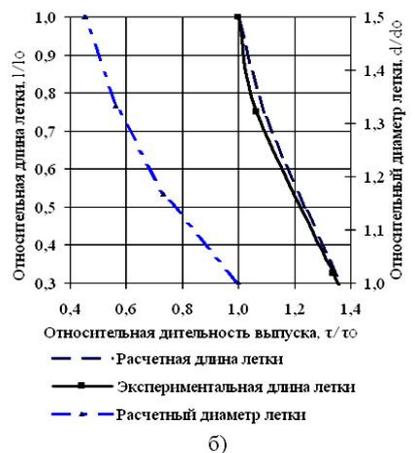
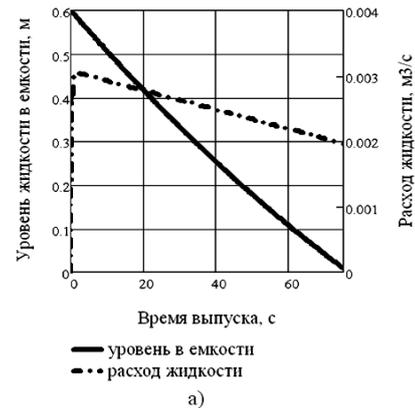


Рис. 2. Взаимосвязь между длительностью выпуска и уровнем (расходом) жидкости (а) и сравнительная оценка влияния длины и диаметра летки на длительность выпуска (б): l_0, d_0 и τ_0 — принятые начальные параметры длины, диаметра летки и длительности выпуска соответственно

Расчетные данные по длительности выпуска через летки различной длины соответствуют результатам экспериментов [1], что свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

При эксплуатации летки конвертера в результате размывания потоком истекающего расплава её внутренний диаметр изменяется, что также способно оказать влияние на длительность выпуска (рис. 2, б). Так, увеличение диаметра летки на 50 % приводит к почти двукратному сокращению продолжительности выпуска, что, в соответствии с требованиями технологической

инструкции, служит основанием для ремонта или замены сталевого выпускного канала.

Выводы и перспективы дальнейших исследований

1. С использованием метода диаграмм связей разработана математическая модель гидродинамических процессов истечения жидкой фазы в системе «жидкая ванна конвертера — сталевого выпускного канал», адекватно описывающая физические процессы, протекающие как в условиях истечения металла из 260-т кислородного конвертера, так и истечения жидкой фазы на холодной модели летки.

2. Разработан модуль функционального оператора гидродинамики движения жидкой фазы в системе «жидкая ванна конвертера — сталевого выпускного канал», который реализован в оболочке Mathcad.

3. Получены численные решения системы дифференциальных уравнений, описывающих гидродинамические процессы в летке. Информация, полученная в результате численных экспериментов, обеспечивает возможность решения задач конструирования сталевого выпускных узлов.

4. Предложенная модель позволяет оценить влияние геометрических параметров выпускного канала на длительность выпуска плавки по ходу кампании конвертера по футеровке. Показано, что уменьшение толщины футеровки кислородного конвертера и, соответственно, длины выпускного канала, приводит к увеличению длительности выпуска расплава из агрегата по окончании плавки. В то же время, в ходе кампании летки её внутренний диаметр увеличивается, что приводит к сокращению продолжительности выпуска.

5. Используемый для построения модели метод диаграмм связей применим для решения более сложных задач и позволяет выполнять расчеты для раз-

личных конструкций леток, в том числе для двухкамерных леток с подачей нейтрального газа в её полость с целью реализации углеродного потенциала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулик А.Д. Совершенствование выпуска стали из конвертера / А.Д. Кулик, М.А. Кашеев, А.А. Похвалитый // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №1. – С. 18–20.
2. Метод диаграмм связи при моделировании гидродинамики выпуска металла из конвертера. Особенности построения топологических структур связи и актуальность применения их в металлургии / В.Т. Тучин, А.Д. Кулик, А.П. Огурцов [и др.] // *Математичне моделювання*. – 2013. – №2(29). – С. 91–95.
3. Влияние геометрических параметров конвертера на процесс выпуска плавки / А.П. Огурцов, А.Д. Кулик, А.А. Похвалитый / 25 міжнародна науково-практична конференція «Інноваційний потенціал світової науки – ХХІ сторіччя», 3-7 березня 2014 р, Запоріжжя, С. 85–89
4. Совершенствование выпуска стали из конвертера. Двухкамерная летка / А.А. Похвалитый, А.П. Огурцов, А.Д. Кулик [и др.] // *Труды тринадцатого конгресса сталеплавильщиков*. (г. Полеское, 12-18 октября 2014 г.). – Москва, 2014. – С. 105–108.
5. Высокотемпературное моделирование выпуска плавки из конвертера с подачей аргона в полость летки / А.А. Похвалитый, А.Д. Кулик, Е.Н. Сигарев [и др.] // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2016. – №2. – С. 52-57.
6. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 394 с.

пост. 29.06.2017