

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

ТОВАРОВСКИЙ И.Г. (ИЧМ), КРАСАВЦЕВ А.И., ЯРОШЕВСКИЙ С.Л. (ДонГТУ),
НОЗДРАЧЕВ В.А. (ОАО «КОНСТАНТИНОВСКИЙ МЕТЗАВОД»)

Разработана комплексная методика расчетного анализа доменной плавки, основанная на совмещении системы уравнений общего и многозонного материально-тепловых балансов при описании процессов тепло-массообмена и газодинамики простыми зависимостями, которые легко контролируются данными практики. По точности прогноза показателей плавки методика не уступает сложным моделям и позволяет предметно анализировать ожидаемые сдвиги в ходе процессов при изменении параметров плавки. Даются примеры распределения температуры и теплоемкости по высоте печи.

Известные методики проектных расчетов показателей доменной плавки, в первую очередь получивший наибольшее распространение метод профессора А.Н. Рамма [1], основаны на совместном решении системы уравнений материального и теплового баланса с определением ожидаемых в заданных условиях расходов сырья, флюсов и кокса, выхода и состава шлака, а также соответствующих газодутьевых параметров (дутья, фурменного и колошниковогаз). При этом параметры, зависящие от кинетики тепло- и массообмена, а также газодинамические характеристики задаются из опыта в виде ожидаемых степени прямого восстановления, температуры колошниковогаза, интенсивности плавки и доли теплопотерь во внешнее пространство от общего расхода тепла. Точность прогноза показателей зависит от удачи в выборе указанных характеристик, величины которых можно задать достаточно обоснованно для изученных режимов, но весьма затруднительно для новых, особенно нетрадиционных. При этом остается неясным ход процессов в отдельных зонах по высоте печи, который может стать определяющим для функционирования технологии в целом.

С целью анализа хода процессов уравнения материально-теплового баланса совмещают с системой уравнений тепло-массообмена по высоте печи. Такие описания принято называть кинетико-математическими моделями, в отличие от балансовых. Их преимуществом является возможность анализа процессов по высоте печи при разных условиях с определением предельных состояний. Однако в связи с отсутствием большого количества сведений о ходе превращений компонентов шихты, полное описание процессов затруднительно, а точность прогноза выходных параметров не выше, чем в случае применения простых кинетических зависимостей, полученных обобщением практических данных [2].

Исходя из этого, разработана методика прогноза показателей плавки, основанная на совмещении системы уравнений общего материально-теплового баланса с многозонным материально-тепловым балансом при описании процессов тепло-массообмена и газодинамики простыми зависимостями [3]. Эти зависимости, легко контролируемые данными практики, по точности прогноза конечных показателей не уступают моделям и позволяют предметно анализировать ожидаемые сдвиги в ходе процессов при изменении параметров плавки и использовании нетрадиционных технологий.

Состав методики и схема расчета

Методика включает в себя следующие расчетные модули: шихта, газификация угля, офлюсование, кокс, теоретическая температура, зоны, цикл, расчеты вне цикла, базовые варианты, сравнительные варианты.

Шихта: решение системы балансных уравнений по Fe, Mn, MgO, Al₂O₃, CaO/SiO₂, выходу шлака, из которой по заданному химическому составу компонентов шихты и заданному расходу кокса определяются расходы составляющих шихты (агломератов, окатышей, руд, флюсов и т.д.), а также количество и состав шлака. При этом [Mn], (MgO), (Al₂O₃) могут быть заданы заранее или не заданы. В первом случае определяются расходы Mn-содержащих, (MgO) и (Al₂O₃)-содержащих компонентов шихты, которые необходимо задать в шихту. Во втором случае вычисляются величины [Mn], (MgO), (Al₂O₃), которые зависят от содержания этих компонентов в шихте.

Газификация угля: производится расчет процесса газификации угля для вдувания продуктов газификации (ПГУ) в доменную печь; определяется количество флюсов, необходимых для офлюсования золы и других вдуваемых с углем компонентов.

Офлюсование: производится распределение необходимого количества флюса между прифурменными газификаторами угля, агломератом и загрузкой в доменную печь в сыром виде. Состав агломерата при этом пересчитывается.

Кокс: расчет расходов кокса, дутья и колошникового газа при заданных r_d — степени прямого восстановления, Z_{Σ} — относительной доли теплотеря и T_k — температуре колошника. Определяется состав колошникового газа. Рассчитывается общий тепловой баланс.

Теоретическая температура (T_T): расчет теоретической температуры горения на основе данных модуля кокс при заданных расходах дутья, твердой, газообразной добавки и продуктов газификации угля (м³/т чугуна). В случае необходимости задания постоянного значения теоретической температуры один из параметров (содержание кислорода, температура дутья, расход твердой, газообразной добавки или расход продуктов газификации угля) варьируется до получения теоретической температуры равной заданному значению с возвратом в модуль кокс.

Зоны: расчет материальных и температурно-тепловых характеристик последовательно в 12 температурных зонах по высоте печи: 1-я зона — температура шихты от загрузки до 400°C, далее через каждые 100°C. Схема распределения теплопотребления приведена на рисунке 1.

В каждой зоне определяется объем материалов и время их пребывания, а также температура и состав входящих и выходящих газов. Теплопотери по зонам распределяются пропорционально произведению квадрата средней температуры газов на время пребывания материалов в зоне. Коэффициент теплопередачи изменяется в зонах пропорционально средней температуре газов.

Цикл: итерационный цикл охватывает рассмотренные выше модули и организован по уточнению сходимости суммарного времени пребывания материалов в печи, определенного ($\tau_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{12} \tau_i$, i — номер зоны) и времени пребывания, вычисленного по производительности печи и плотности материалов (τ_{Π}). В ходе итераций варьируется и уточняется T_k — температура колошникового газа. Ее значение меняется в каждой итерации (l — номер итерации). На рисунке 2 приведена схема алгоритма. Ход решения следующий: задаются исходные данные и предварительная величина расхода кокса. Производится расчет

шихта ⇒ газификация угля ⇒ флюсование.

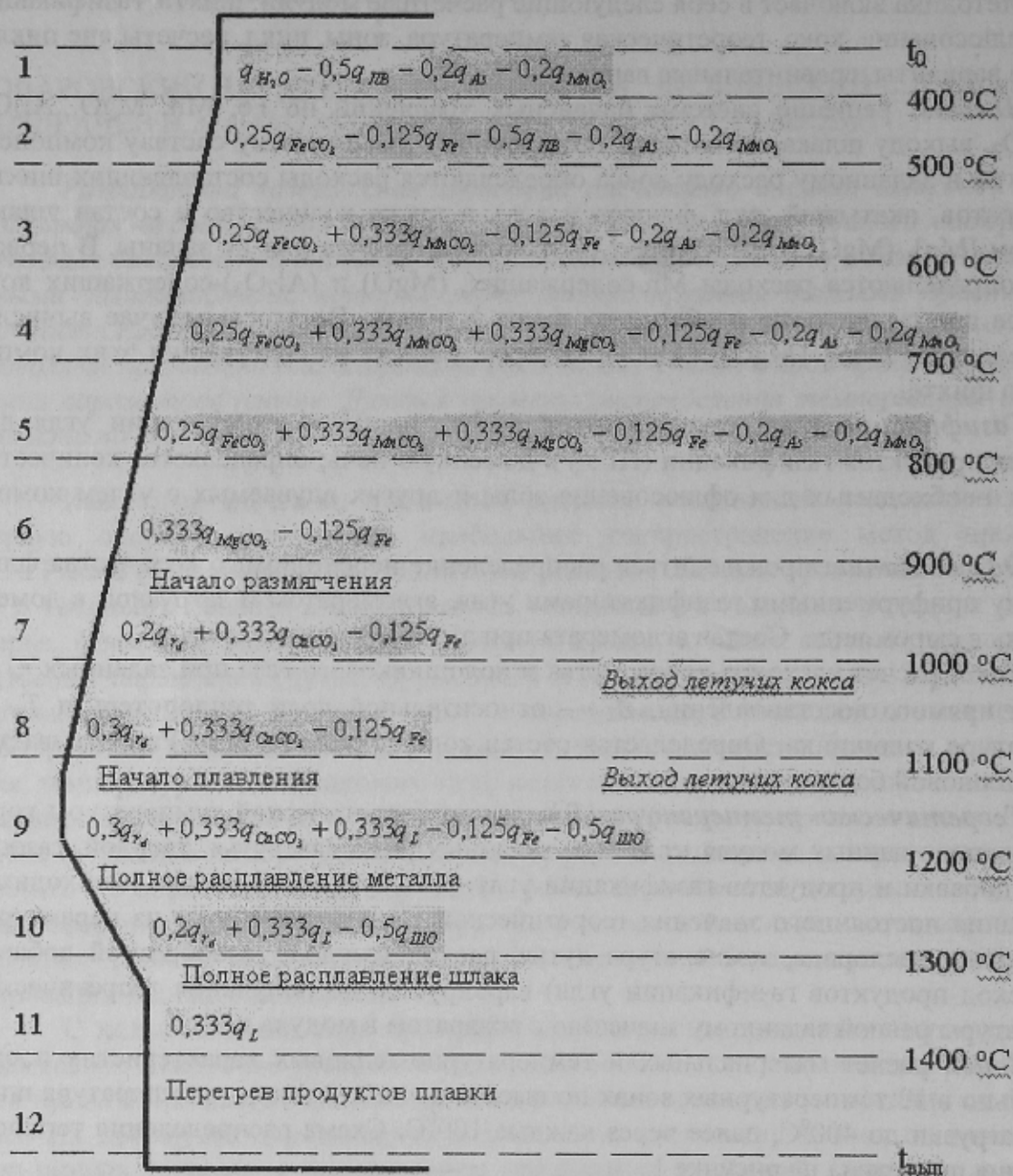


Рисунок 1 — Схема распределения теплотребления по зонам: (+), (-) — поглощение, выделение тепла соответственно; q_{H_2O} — тепло испарения влаги шихты, кДж/т чугуна; $q_{лв}$ — тепло реакций восстановления Cu, Ni, Co, кДж/т чугуна; q_{As}, q_{MnO_2} — тепло реакций восстановления As, MnO_2 , кДж/т чугуна; $q_{Fe_2O_3}, q_{CaCO_2}, q_{MgCO_2}, q_{MnCO_2}$ — тепло диссоциации карбонатов и взаимодействия CO_2 с углеродом, кДж/т чугуна; q_{Fe} — тепло газового восстановления железа, кДж/т чугуна; q_{rd} — тепло прямого восстановления железа, кДж/т чугуна; q_L — тепло восстановления Si, Mn, P, V, Ti, Cr и перевода серы в шлак, кДж/т чугуна; $q_{шo}$ — тепло шлакообразования, кДж/т чугуна

Задаются граничные значения температуры колошника (T_K): $T_{min}(l)$ и $T_{max}(l)$, а значение T_K принимается:

$$T_k = [T_{min}(l) + T_{max}(l)] \cdot 0,5.$$

В первой итерации ($l=1$): $T_{min}=20$; $T_{max}=500$. Далее расчет кокс $\Rightarrow T_m \Rightarrow$ зоны и возврат к началу расчета — шихта при несовпадении τ_Σ и τ_{II} . При этом:

$$\text{Если } (\tau_\Sigma - \tau_{II}) > 0, \text{ то: } \begin{cases} T_{max}(l) = T_k(l-1) \\ T_{min}(l) = T_{min}(l-1) \end{cases}$$

$$\text{Если } (\tau_\Sigma - \tau_{II}) < 0, \text{ то: } \begin{cases} T_{max}(l) = T_{max}(l-1) \\ T_{min}(l) = T_k(l-1) \end{cases}$$

В каждой итерации (l) T_k определяется как средняя величина между $T_{min}(l)$ и $T_{max}(l)$ и подставляется в исходные данные при расчете кокс. Цикл оканчивается при $(\tau_\Sigma - \tau_{II}) < 0,1$ по абсолютной величине.

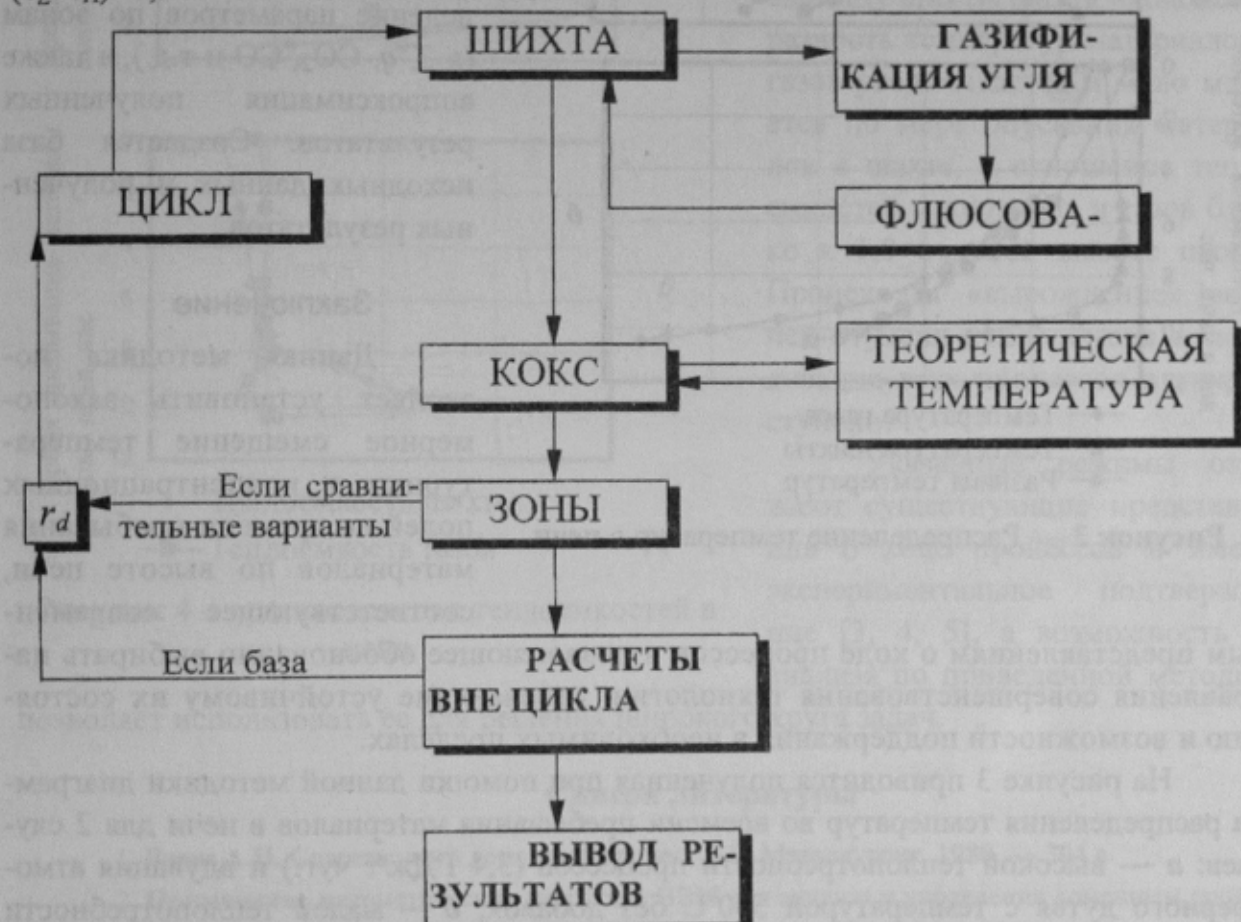


Рисунок 2 — Алгоритм расчета показателей и процессов доменной плавки.

Расчеты вне цикла: при заданной для базового варианта производительности печи Π (т/час) определяются величины скорости и мощности истечения струи дутья из фурм, газопроницаемости столба и вспомогательные параметры базовых вариантов, необходимые для расчета r_d и Π в сравнительных вариантах. Производится расчет себестоимости чугуна и сквозных энергозатрат.

Базовые варианты: производится расчет базовых вариантов, в которых заданы r_d , Π и формируются комплексные параметры для расчета r_d и Π в сравнительных вариантах. Результаты направляются в модуль **кокс**.

Сравнительные варианты: по значениям комплексных параметров базового варианта рассчитываются r_d и Π любого сравнительного варианта, и производится общий расчет. При производстве вычислений по формулам (базовые и сравнительные варианты) иногда используются величины, которые определяются после данных

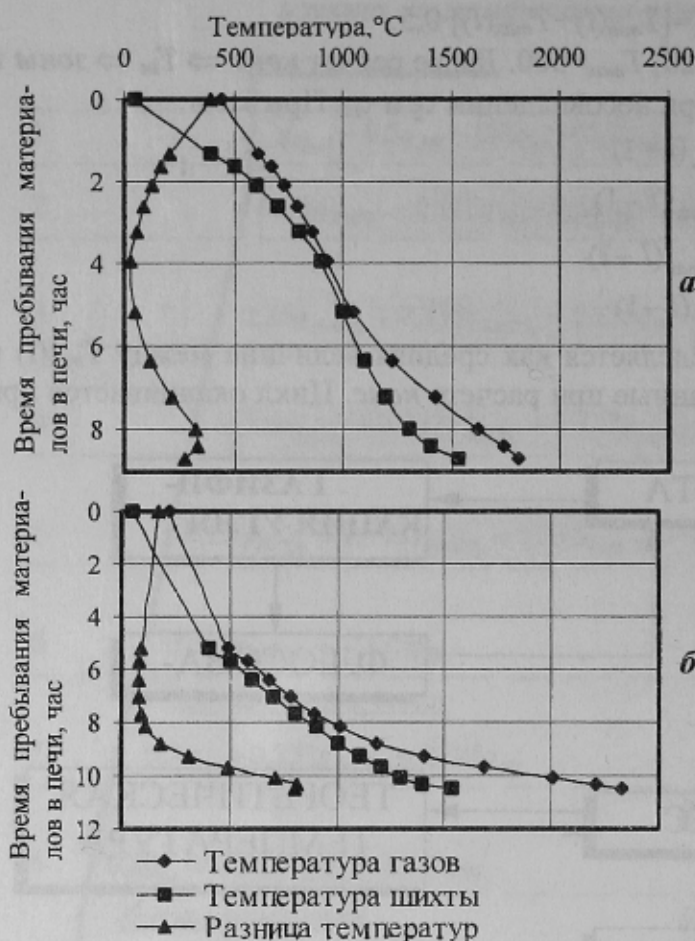


Рисунок 3 — Распределение температур в печи

ным представлениям о ходе процессов и позволяющее обоснованно выбирать направления совершенствования технологии, отвечающие устойчивому их состоянию и возможности поддержания в необходимых пределах.

На рисунке 3 приводится полученная при помощи данной методики диаграмма распределения температур во времени пребывания материалов в печи для 2 случаев: *а* — высокой теплотребности процессов (3,4 ГДж/т чугуна) и вдувания атмосферного дутья с температурой 500°C без добавок; *б* — малой теплотребности процессов (2,9 ГДж/т чугуна) и вдувания обогащенного кислородом до 50% дутья с температурой 1100°C при вдувании природного газа.

На рисунке 4 показано изменение теплоемкостей шихты и газа для тех же случаев.

Результаты расчетов характерны для двух режимов теплообмена в доменной печи:

а — обычный двухступенчатый теплообмен, при котором в шахте (верхняя ступень) теплоемкость газа превышает теплоемкость материалов (кДж/т чугуна) и по мере опускания и прогрева материалов разность температур материалов и газов уменьшается до некоторого минимального значения, при котором отношение теплоемкостей материалов и газов переходит через 1,0, после чего теплоемкость материалов становится выше теплоемкости газов и разность температур вновь увеличивается (нижняя ступень). Увеличение теплоемкости материалов обусловлено ростом те-

формул в записанной последовательности выражений. В этих случаях представляются значения величин из предыдущей итерации.

Вывод результатов:

результаты выдаются в таблицу. Набор показателей — в нескольких вариантах разного объема. Кроме того, возможен графический вывод — распределение параметров по зонам (t , T , q , CO_2 , CO и т.д.), а также аппроксимация полученных результатов. Создается база исходных данных и полученных результатов.

Заключение

Данная методика позволяет установить закономерное смещение температурных и концентрационных полей во времени пребывания материалов по высоте печи, соответствующее современ-

плотнотребляющих процессов прямого восстановления, а последующее ее снижение — завершением этих процессов в нижних горизонтах печи.

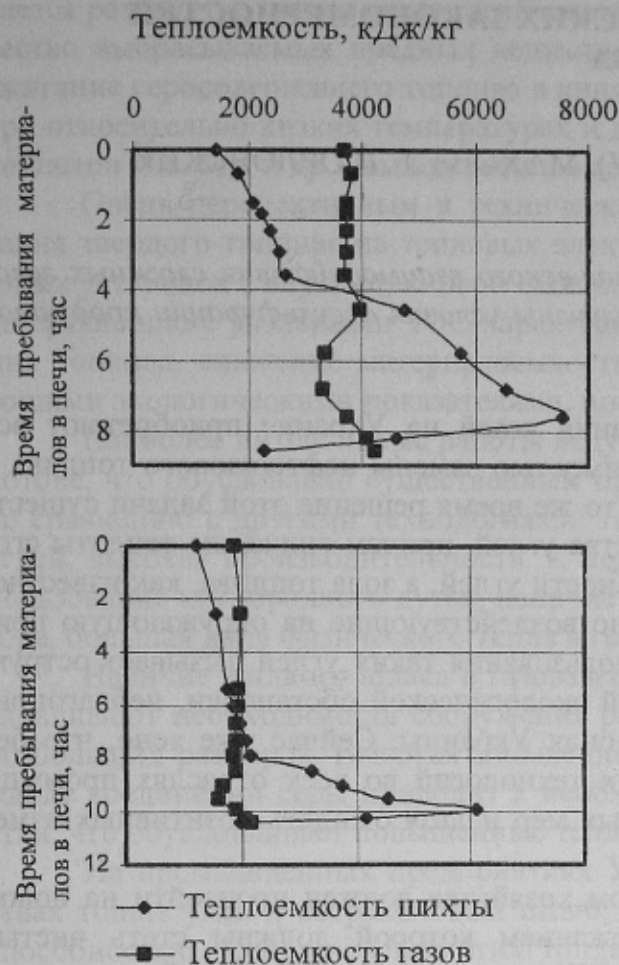


Рисунок 4 — распределение теплоемкостей в печи

При этом в области протекания этих процессов выделяющийся монооксид углерода увеличивает теплоемкость газа (кДж/т чугуна).

б — предельные условия теплообмена, при которых вследствие малого количества газа на единицу шихты шахта «холодает», разность температур материалов и газов увеличивается и мало меняется по мере опускания материалов в шахте, а отношение теплоемкостей материалов и газов близко к 1,0 по всей высоте шахты. Происходит «вырождение» верхней ступени теплообмена и локализация всех процессов в нижней ступени.

Указанные режимы отражают существующие представления о ходе процессов и имеют экспериментальное подтверждение [3, 4, 5], а возможность их анализа по приведенной методике

позволяет использовать ее для решения широкого круга задач.

Список литературы

1. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. — 304 с.
2. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин, В.А. Улахович — М.: Металлургия, 1978. — 264 с.
3. Товаровский И.Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. — М.: Металлургия, 1987. — 192 с.
4. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Л. Теплообмен в доменной печи. — М.: Металлургия, 1966. — 255 с.
5. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спиринов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко // Екатеринбург. УГТУ, 1995. — 243 с.

© Товаровский И.Г., Красавцев А.И., Ярошевский С.Л., Ноздрачев В.А., 1999.