

УДК 669.141.243/247:669.17.046

**А.С.Вергун, В.Г.Кисляков, В.Ф.Поляков, В.П.Корченко,
Л.Г.Тубольцев, А.Ф.Шевченко, Н.И.Падун**

ДЕСУЛЬФУРАЦИЯ МЕТАЛЛА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ «УДЧ–КОНВЕРТЕР–КП»

Показано, что использование комплексов «Установка десульфурации чугуна (далее УДЧ)–Конвертер» и «УДЧ–Конвертер–Ковш–печь» (далее КП) обеспечивает возможность оптимизации затрат на производство стали, расширяет сортмент дефицитных видов продукции, позволяет устранить ряд ограничительных условий, затрудняющих текущее производство.

Современное состояние вопроса. Для мировой металлургии одной из основных задач в настоящее время является получение новых видов металлопродукции, в т.ч. так называемых «чистых» сталей. Это требует разработки и совершенствования рациональных схем производства жидкого металла, обеспечивающих получение минимального содержания вредных примесей. Оценка возможностей производства таких сталей в условиях кислородно-конвертерного передела является актуальным вопросом.

Методика исследования. Данное исследование выполнено на основе анализа плавков текущего производства кислородно-конвертерных цехов с конвертерами емкостью 100 т с комбинированной продувкой. Основной задачей анализа являлась практическая оценка возможностей составляющих комплекса «УДЧ–Конвертер–КП» для обеспечения получения низкосернистой (менее 0,010% серы) стали. Плавки проводились в период освоения агрегата УДЧ и КП, и при этом было опробовано значительное количество плавков, существенно отличающихся по шихтовым условиям и технологии производства. Это дало возможность на основе статистического анализа определить характеристики конкретных вариантов, в т.ч. по содержанию серы в металле, что представляет интерес как в практическом, так и в теоретическом плане.

Для проведения анализа были использованы выборки данных по плавкам текущего производства. В объем одной из них вошли 14 плавков, проведенных в комплексе «Конвертер–КП» с использованием среднефосфористого чугуна (содержание фосфора 0,73–0,86%). Для анализа выборку разделили на две группы. Основным различием между группами плавков было то, что металл плавков второй группы проходил операцию дополнительного рафинирования в КП. Кроме этого, между группами имеется существенное различие по ряду других технологических и технико-экономических показателей. Технологические и технико-экономические показатели по группам плавков представлены в табл.1.

Таблица 1. Технологические и технико-экономические показатели по группам кислородно-конвертерных плавков

№	Наименование показателей	1 группа плавков		2 группа плавков	
		Min значение	Max значение	Min значение	Min значение
1	Масса чугуна, т	71,65	73,85	84,80	85,65
2	Температура чугуна, °С	1287	1320	1336	1361
3	Расход O ₂ на продувку, м ³ /плавку	4383	5185	4900	4973
4	Расход извести (СаО), кг/т жидкой стали	37,60	89,70	Н.д.	Н.д.
5	Температура металла на выпуске, °С	1650	1680	1654	1679
6	Химический состав чугуна, %				
–	Марганец	0,45	0,59	0,50	0,52
–	Кремний	0,26	0,61	0,70	1,34
–	Сера	0,042	0,066	0,040	0,042
–	Фосфор	0,73	0,83	0,79	0,86
7	Химический состав металла на выпуске из конвертера, %				
–	Углерод	0,05	0,23	0,09	0,17
–	Сера	0,049	0,075	0,020	0,031
–	Фосфор	0,025	0,066	0,013	0,017
8	Химический состав готовой стали, %				
–	Углерод	0,04	0,17	0,42	0,47
–	Марганец	0,25	0,48	0,66	0,69
–	Кремний	0,02	0,20	0,25	0,29
–	Сера	0,041	0,058	0,002	0,008
–	Фосфор	0,018	0,034	0,012	0,020
9	Масса готовой стали, т	90,09	93,08	90,00	90,60
10	Расход материалов для рафинирования в КП				
–	Шлак рафинировочный, кг/плавку	0	0	300	315
–	Шлак рафинировочный, кг/т стали	0	0	3,33	3,33
–	СаО, кг/плавку	0	0	600	600
–	СаО, кг/т стали	0	0	6,66	6,66
–	СаF ₂ , кг/плавку	0	0	225	225

–	CaF ₂ , кг/т стали	0	0	2,50	2,50
–	CaSi, кг/плавку	0	0	280	280
–	CaSi, кг/т стали	0	0	3,11	3,11
–	CaC ₂ , кг/плавку	0	0	50	50
–	CaC ₂ , кг/т стали	0	0	0,55	0,55
11	Суммарный расход материалов в КП, кг/т стали	0	0	16,15	16,15

Металл плавков первой группы относится к рядовым сталям массового производства. Металл плавков второй группы выплавлялся для получения среднеуглеродистых сталей с низким содержанием серы. Приведенные данные показывают, что при варианте использования КП содержание серы в стали составляло 0,002–0,008%. Однако, такой результат был достигнут не только за счет операции рафинирования в этом агрегате. Во-первых, были приняты специальные меры по выбору либо целенаправленной выплавке чугуна с содержанием серы в пределах 0,040–0,042% против 0,042–0,066% для плавков первой группы. Во-вторых, расход чугуна был увеличен с 71,65–73,85 т до 84,8–85,65 т, т.е. на 12–13 тонн. Соответственно на такую же величину был сокращен расход металлолома, содержание серы в котором обычно выше, чем 0,04%.

В результате этих мер, при практически равном содержании углерода в металле на выпуске из конвертера, содержание серы на выпуске металла для второй группы плавков составляло 0,020–0,031% против 0,049–0,075% для металла первой группы. Дальнейшее снижение содержания серы в металле плавков второй группы до 0,002–0,008% достигнуто в результате обработки в КП, где в качестве десульфураторов использовали: рафинировочный шлак, известь, плавиковый шпат, силикокальций, карбид кальция (табл.1). В КП производили также науглероживание металла с 0,09–0,17% до 0,42–0,47%. В результате была получена качественная среднеуглеродистая сталь.

В состав следующей выборки вошла 41 плавка, которые были проведены с использованием низкофосфористого чугуна с содержанием фосфора в пределах 0,10–0,13%. В выборку вошли данные производства различных марок стали, в связи с чем содержание углерода на повалке конвертера составляло от 0,04 до 0,81%. Для части плавков чугун подвергали внепечной десульфурации. Расход металлолома изменялся почти в два раза и составлял 5,0 и 8,7–9,4 тонны. Металл всех плавков обрабатывался в КП (время обработки 35–70 мин). Комплекс реагентов, используемых в КП, был практически постоянным, но расход их был различным.

Учитывая большое число отличительных признаков, для проведения анализа всю совокупность плавков разделили по технологическим комплексам: «Конвертер–КП» и «УДЧ–Конвертер–КП». В каждом технологическом комплексе плавки были разделены по содержанию углерода в

металле на повалке конвертера, по расходу лома, по длительности рафинирования и расходу реагентов в КП.

За основу классификации по вариантам производства были взяты технологические операции и параметры, оказывающие решающее влияние на процесс десульфурации металла. В результате было выделено 5 групп плавков:

1 группа – «Конвертер–КП», низкое содержание углерода на повалке конвертера; 2 группа – «Конвертер–КП», среднее содержание углерода на повалке конвертера; 3 группа – «Конвертер–КП», среднее содержание углерода на повалке конвертера, продолжительная обработка и увеличенный расход реагентов в КП; 4 группа – «УДЧ–Конвертер–КП», высокое содержание углерода на повалке конвертера; 5 группа – «УДЧ–Конвертер–КП», высокое содержание углерода на повалке конвертера, сокращенный расход лома.

Результаты исследования. В табл.2 по группам плавков приведены технологические параметры, которые оказывают решающее влияние на процесс десульфурации металла в анализируемых технологических комплексах. Результаты десульфурации металла в различных технологических комплексах выплавки стали в сопоставительной форме приведены в табл.3.

На плавках первой группы были самые благоприятные условия для десульфурации в конвертере вследствие низкого содержания углерода в металле на повалке. Естественно, на такие плавки направлялся чугун с самым высоким содержанием серы. В процессе продувки в конвертере содержание серы снизилось с 0,032–0,060% до 0,024–0,041%, а после обработки в КП до 0,010–0,024%. В среднем по минимальному и максимальному значениям (табл.3) величина снижения содержания серы в КП составила 0,0185%.

На плавках второй группы содержание углерода в металле на повалке было в среднем на 0,16% выше, чем на плавках первой группы, а верхний предел содержания серы в чугуне – в 1,5 раза ниже (0,040%). Содержание серы в металле на повалке было таким же, как и в металле плавков первой группы. В процессе обработки металла в КП содержание серы снизилось в среднем на 0,015%. При практически одинаковом расходе реагентов в КП различие в результатах десульфурации связаны с более высоким содержанием углерода в обрабатываемом металле плавков второй группы.

Относительно роли содержания углерода в обрабатываемом металле следует отметить следующее. На плавках первой выборки, металл которых обрабатывался в КП (табл.1, вторая группа) достигнуто содержание серы в готовой стали 0,002–0,008% (табл.1). Одной из особенностей этих плавков является низкое (0,009–0,017%) содержание углерода в металле на выпуске из конвертера, т.е. перед обработкой в КП. В готовой стали содержание углерода было 0,42–0,47%.

Таблица 2. Минимальные и максимальные значения технологических и технико-экономических показателей по группам плавок

№	Показатели	1 группа		2 группа		3 группа		4 группа		5 группа	
		Min	Max								
1	Масса чугуна, т	79,0	82,5	80,1	83,0	80,9	81,2	79,0	82,2	85,0	85,3
2	Масса металлолома, т	9,0	9,4	8,7	9,3	9,0	9,3	9,0	9,0	5,0	5,0
3	Масса металлозавалки, т	88,3	91,5	89,3	91,7	90,2	90,2	88,0	91,2	90,0	90,3
4	Расход извести (CaO), т/плавку	4,250	5,500	4,0	5,8	5,5	5,6	4,9	5,3	5,6	6,2
5	Расход извести (CaO), кг/т стали	47,7	61,73	44,79	64,44	60,98	62,08	54,87	60,23	62,22	68,89
6	Химсостав чугуна %										
–	Углерод	4,01	4,86	4,25	4,60	4,58	4,62	4,65	4,72	4,60	4,72
–	Марганец	0,27	0,35	0,30	0,33	0,30	0,31	0,24	0,25	0,25	0,26
–	Кремний	0,32	1,02	0,41	0,59	0,40	0,42	0,44	0,47	0,52	0,66
–	Фосфор	0,10	0,13	0,11	0,14	0,13	0,13	0,11	0,13	0,118	0,130
–	Сера	0,032	0,060	0,027	0,040	0,028	0,029	0,007	0,014	0,004	0,0046
7	Температура чугуна, °С	1280	1320	1290	1320	1305	1309	1290	1330	1277	1320
8	Химсостав металла на выпуске, %										
–	Углерод	0,04	0,08	0,17	0,27	0,25	0,27	0,69	0,72	0,73	0,81
–	Сера	0,024	0,041	0,025	0,040	0,012	0,015	0,029	0,035	0,0055	0,009
9	Температура металла на выпуске, °С	1581	1679	1581	1632	1585	1589	1591	1619	1585	1629
10	Масса стали в ковше, т	80,0	81,5	80,2	81,5	81,0	81,2	81,2	82,3	79,2	82,2
11	Выход жидкого, % к ме-	88,4	91,39	88,3	90,6	89,8	90,0	89,0	93,3	88,0	91,3

	таллошихте	35	42	37	40	60	70	37	39	40	45
12	Длительность рафинирования в КП, мин										
13	Расход материалов для рафинирования в КП										
-	CaO, кг/плавку	400	700	700	700	600	800	400	500	400	400
-	CaO, кг/т стали	4,94	8,65	8,64	8,64	7,4	9,9	4,9	6,1	4,93	4,93
-	CaC ₂ , кг/плавку	0	100	0	0	150	150	20	30	40	60
-	CaC ₂ , кг/т стали	0	1,24	0	0	1,85	1,85	0,24	0,36	0,49	0,74
-	Шлак рафинировочный, кг/плавку	300	350	350	350	500	500	400	400	400	400
-	Шлак рафинировочный, кг/т стали	3,71	4,33	4,32	4,32	6,16	6,16	4,88	4,88	4,93	4,93
-	CaSi, кг/плавку	80,0	100	80	80	80	80	45	45	54	54
-	CaSi, кг/т стали	0,99	1,24	0,99	0,99	0,99	0,99	0,55	0,55	0,66	0,66
14	Суммарный расход материалов в КП, кг/т стали	9,64	15,46	13,95	13,95	16,4	18,9	10,57	11,89	11,01	11,26
15	Содержание серы в стали после рафинирования, %	0,010	0,018	0,011	0,024	0,004	0,006	0,023	0,024	0,005	0,012

Таким образом, этап десульфурации либо предшествовал, либо проходил одновременно с науглероживанием, но в целом производился в более благоприятных условиях по содержанию углерода в металле. Вторым фактором, обеспечившим высокий уровень десульфурации, был повышенный расход рафинирующих реагентов в КП (порядка 16 кг/т), т.е. такой же, как и для плавков третьей группы (табл.1 и 3).

На плавках третьей группы содержание углерода в металле на повалке было практически таким же, как при верхнем пределе плавков второй группы, а верхний предел содержания серы в чугуне – на 0,011% ниже, т.е. условия для десульфурации в конвертере были практически близкими. Однако содержание серы в металле на повалке конвертера было в 2,0–2,4 раза ниже, поскольку были приняты дополнительные меры по повышению степени десульфурации металла в конвертере (проведено скачивание шлака и наводка нового). В процессе обработки металла в КП содержание серы снизилось с 0,012–0,015% до 0,004–0,006%, т.е. на 0,008–0,009%. По величине снижение содержания серы было ниже, чем для плавков первой и второй группы, что связано с более низким исходным содержанием серы в металле и характерно для всех сталеплавильных процессов.

На плавках четвертой группы содержание серы в исходном чугуне было существенно ниже и составляло 0,007–0,014% (после обработки на УДЧ). Однако, в процессе продувки в конвертере содержание серы в металле возросло до 0,029–0,035%, что, в первую очередь, связано с поступлением серы из металлолома и ковшевого шлака, сформировавшегося после обработки на УДЧ. Величина снижения содержания серы в КП составила в среднем 0,0085%, что в 1,8–2,2 раза ниже, чем на плавках первой и второй групп, и связано это с более высоким (0,69–0,72%) содержанием углерода в обрабатываемом металле.

На плавках пятой группы содержание серы в исходном чугуне составляло 0,0040–0,0046%, в металле на повалке – 0,0055–0,0090%. На этих плавках влияние факторов, обуславливающих повышение содержания серы, снижено уменьшением количества лома, по сравнению с плавками четвертой группы, с 9 до 5 тонн. После обработки металла в КП содержание серы составило 0,005–0,012%, т.е. в среднем несколько выше, чем в исходном металле (на повалке конвертера).

Если сопоставить показатели плавков пятой и третьей группы, на которых были достигнуты самые высокие результаты по десульфурации, то наиболее существенными отличиями для плавков третьей группы являются (табл.3):

более низкое (в три раза) содержание углерода в обрабатываемом металле;

большая (в 1,5 раза) продолжительность обработки металла;

большой (1,5–1,7 раза) расход рафинирующих реагентов.

Таблица 3. Результаты десульфурации металла в различных технологических комплексах

Технологический комплекс и группа плавок	Расход и металлолома, т	Содержание углерода в металле на повалке, %	Содержание серы в исходном чугуне, %	Содержание серы в металле на повалке, %	Содержание серы в металле на талле	Содержание серы в металле на талле в посылке, %	Снижение содержания серы в посылке, %	Длительность обработки КП, мин	Суммарный расход реагентов в КП, кг/т
Конвертер—КП									
1	9,0–9,4	0,04–0,08	0,032–0,060	0,024–0,041	0,010–0,018	0,014–0,023	0,014–0,023	35–42	9,64–15,46
2	8,7–9,3	0,17–0,27	0,027–0,040	0,025–0,040	0,011–0,024	0,014–0,016	0,014–0,016	37–40	13,95
3	9,0–9,3	0,25–0,27	0,028–0,029	0,012–0,015	0,004–0,006	0,008–0,009	0,008–0,009	60–70	16,4–18,9
УДЧ—Конвертер—КП									
4	9,0	0,69–0,72	0,007–0,014	0,029–0,035	0,023–0,024	0,006–0,011	0,006–0,011	37–39	10,57–11,89
5	5,0	0,73–0,81	0,004–0,0046	0,0055–0,0090	0,005–0,0120	0,0005–0,0003	0,0005–0,0003	40–45	11,01–11,26

Таким образом, проблема обеспечения низких содержаний серы в КП является сложной и конечный результат определяется многими факторами. К главным из них относятся следующие:

- содержание серы в металле на выпуске из конвертера;
- расход рафинирующих реагентов;
- продолжительность обработки металла в КП;
- содержание углерода в металле, обрабатываемом в КП.

В КП достигаются достаточно низкие содержания серы, например, 0,002–0,008% при исходном содержании серы 0,020–0,031% (табл.1, вторая группа плавов) или 0,004–0,006% при исходном содержании серы 0,012–0,015% (табл.2 и 3, третья группа плавов). Общими факторами для этих групп плавов являются высокий расход реагентов (16–19 кг/т и продолжительная обработка металла (60–70 мин).

Достаточно высокий расход реагентов (порядка 10–15 кг/т) был на плавках первой и второй групп (табл.3), и снижение содержания серы составило от 0,014% до 0,023%, но в металле после рафинирования не было получено содержание серы менее 0,010–0,011%. Длительность обработки металла этих групп плавов составляла 35–42 мин, т.е. была в 1,5–2,0 раза меньше, чем для групп плавов, на которых было обеспечено содержание серы менее 0,010%.

Самый низкий расход рафинирующих реагентов (порядка 11 кг/т) при длительности обработки 37–45 мин был на группах плавов с обработкой чугуна на УДЧ (табл.3, четвертая и пятая группы). Общим фактором для этих групп плавов было высокое (0,69–0,81%) содержание углерода в обрабатываемом металле. Снижение содержания серы за период обработки для плавов четвертой группы составило 0,006–0,011% (при исходной 0,029–0,035%), т.е. примерно в два раза ниже, чем при обработке плавов с низким и средним содержанием углерода (табл.3, первая и вторая группы).

На плавках пятой группы был сокращенный расход металлолома (5т вместо 9т), и содержание серы в исходном чугуне было самым низким – 0,0040–0,0046%. В процессе конвертерной плавки содержание серы повысилось до 0,0055–0,0090%, а после обработки в КП составило 0,0050–0,0090% для четырех плавов этой группы, а для одной – 0,012%. Вероятнее всего, при увеличении расхода реагентов и длительности обработки можно было бы снизить содержание серы на этой плавке до менее 0,010%. Но сам факт говорит о том, что и в КП для получения низких содержаний серы следует уделять внимание возможным источникам попадания серы в КП.

Получение стали с содержанием серы менее 0,010% может быть обеспечено без использования УДЧ при обработке среднеуглеродистого металла в КП с содержанием серы на выпуске из конвертера в пределах 0,015–0,030%, расходе реагентов на рафинирование в количестве 16–19 кг/т и длительности обработки 60–70 мин. При этом следует учитывать,

что КП является многоцелевым агрегатом. В КП проводится корректировка и усреднение химсостава металла, в т.ч. и серы, модифицирование и микролегирование, корректировка температуры металла, т.е. имеются возможности его подогрева. Наличие такого агрегата в технологическом комплексе значительно расширяет его возможности по производству дефицитных и дорогостоящих видов продукции.

По вопросам выбора рациональной технологической схемы производства качественных низкосернистых сталей к настоящему времени нет однозначного мнения, и связано это с конкретными условиями производства, заказами, коммерческими соображениями и т.д. Однако, появляется все больше данных в пользу универсальной технологической схемы с наличием УДЧ и КП [1,2]. По результатам настоящего анализа наиболее оптимальным для решения широкого круга задач может быть признан комплекс «УДЧ–Конвертер–КП». С одной стороны, выплавка чугуна в доменных печах с серой менее 0,030% в условиях металлургических предприятий Украины, работающих, в основном, на донецком высокосернистом коксе, является сложной и дорогостоящей задачей. Дешевле проводить десульфурации вне доменной печи [3]. С другой стороны, наличие УДЧ стимулирует максимальное использование ее возможностей для снижения содержания серы в чугуне, направляемом в конвертерный цех.

Последующее эффективное использование такого чугуна требует реализации дополнительных мероприятий по ограничению попадания серы в конвертер с другими шихтовыми материалами, а также обеспечения максимальной степени десульфурации металла в процессе конвертерной плавки.

Качественная сопоставительная оценка эффективности комплексов получения стали с низким (менее 0,010%) содержанием серы представлена в табл.4.

Для решения вопроса оптимального использования всех составляющих комплекса «УДЧ–Конвертер–КП» необходимо проведение экономического анализа для конкретных условий, главным аргументом которого должны являться минимальные затраты. При этом следует учитывать, что преимущества комплекса «УДЧ–Конвертер–КП» заключаются в возможности снижения затрат в доменном производстве, снижения затрат на электроэнергию в КП, в гарантированных возможностях производства качественных сталей широкого сортамента, в т.ч. высокоуглеродистых низкосернистых сталей, в организационной и технологической гибкости всего комплекса в целом.

Так, например, при поставке из доменного цеха в конвертерный чугун с содержанием серы 0,040–0,060% и необходимости выплавки стали, содержащей 0,015–0,020% серы, может быть использовано только предварительная десульфурация чугуна до уровня 0,01% серы. Производство стали с содержанием серы $\leq 0,01\%$ может быть осуществлено с использованием глубоко обессеренного чугуна ($< 0,005\%$ серы) без ковшевого

шлака и низкосернистого металлолома, либо обессеренного до уровня 0,01% серы чугуна и последующей обработки стали в агрегате КП.

Таблица 4. Сопоставительная оценка комплексных технологий сталеплавильного передела (Наличие требований: Есть (+). Нет (-).

Требования к доменной печи	Составляющие комплекса.		
	УДЧ (затраты)	Конвертер (ограничительные требования)	КП (затраты)
(-)	(+) затраты на магний-содержащие реагенты	(+) ограничения по чистоте применяемого лома	(+) затраты на рафинирующие реагенты (10–12 кг/т), продолжительность обработки 40–45 мин
(-)	(+) затраты на магний-содержащие реагенты	(+) ограничения по чистоте применяемого лома, ограничения по содержанию углерода в металле на выпуске (низкие концентрации углерода)	(-)
(+), ограничения по содержанию серы в чугуне (не более 0,030%)	(-)	(+) ограничения по чистоте применяемого лома, ограничения по содержанию серы в металле на выпуске, дополнительные меры по снижению содержания серы в металле, например скачивание шлака. Ограничения по содержанию углерода в металле на выпуске	(+) затраты на рафинирующие реагенты (16–19 кг/т), продолжительность обработки 60–70 мин

При выплавке стали с содержанием серы $\leq 0,005\%$ целесообразно использовать и технологию десульфурации чугуна и технологию рафинирования стали в агрегате КП. По такому пути идет большинство зарубежных компаний, которые оснащают свои сталеплавильные комплексы КП и УДЧ.

Заключение. Таким образом, в данном исследовании определены основные показатели работы комплексов «Установка десульфурации чугуна (УДЧ) – Конвертер», а также «УДЧ–Конвертер– Ковш-печь (КП)», в отношении возможности десульфурации расплава, при различных шихтовых и сортаментных условиях производства стали широкого сортамента. Полученные данные и анализ мирового опыта свидетельствует о том, что оснащение сталеплавильных цехов предприятий, производящих продукцию широкого сортамента, в т.ч. высококачественную, должно, как правило, производиться одновременно УДЧ и КП, при этом основой принятия решений должен быть экономический анализ с учетом конкретных условий, характеризующих, в первую очередь, применяемые шихтовые материалы и требования к изготавливаемому прокату.

1. *Технология* производства стали в современных конвертерных цехах / С.В.Колпаков, Р.В.Старов, В.В.Смоктый и др. Под общей редакцией С.В.Колпакова. – М.:Машиностроение, 1991. – 464 с.: ил.
2. *К вопросу* о выборе рациональной схемы производства качественной стали / А.С.Вергун, А.Ф.Шевченко, П.С.Лындя, и др. //Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2006. – №3. –С.21–23.
3. *Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С.* Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология. Учебник. –Днепропетровск. – РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук, проф. Э.В.Приходько