



М.Д. КАЦ, д.т.н., главный научный сотрудник, **А.М. ДАВИДЕНКО**, младший научный сотрудник
Украинский государственный научно-технический Центр «Энергосталь» (УкрГНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

МЕТОД КОМПРОМИССНОЙ СУБОПТИМИЗАЦИИ – МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОДНОВРЕМЕННО ПО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ, ЭКОНОМИЧЕСКИМ, ЭКОЛОГИЧЕСКИМ И ДРУГИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

В статье представлен новый подход к повышению эффективности действующих технологических процессов сразу по нескольким выходным показателям. Для решения этой задачи разработан метод компромиссной субоптимизации. Приводится алгоритм реализации этого метода. На примере доменной печи №5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» показана эффективность предлагаемого метода при решении задачи субоптимизации технологического режима доменной плавки с целью одновременного сокращения расхода кокса и количества шлака на тонну чугуна, что позволяет снизить энергопотребление и загрязнение окружающей природной среды.

действующий технологический процесс, идентификация, многокритериальность, метод восстановления одномерных зависимостей, метод компромиссной субоптимизации, многокритериальная субоптимизация

Решение актуальных проблем энергосбережения и защиты окружающей природной среды на различных производствах, как правило, связано с внедрением новых технологий, строительством установок и, соответственно, со значительными инвестициями. Однако частично эти проблемы могут быть решены без создания новых установок и устройств и практически без инвестиций, а за счет оптимизации работы действующего технологического агрегата (технологического процесса). Такая оптимизация даже при не очень большом энергосберегающем, экономическом и природоохранном эффекте может быть актуальной, так как позволяет достаточно быстро и практически без затрат достигнуть положительных результатов на уже действующем объекте. В данной статье приведен новый подход к повышению эффективности действующих технологических процессов сразу по нескольким выходным показателям – энергетическим, экономическим, экологическим.

По своим информационным характеристикам (высокая размерность вектора входных параметров, наличие ненаблюдаемых и неуправляемых параметров, существенная зависимость значений выходных показателей от взаимного влияния различных сочетаний входных параметров и т.п.) современные технологические процессы представляют собой сложные объекты, входные и выходные переменные которых, а также параметры, характери-

зующие внутреннее состояние объекта, зависят от многочисленных, зачастую трудноуловимых факторов. Поэтому получение работоспособного математического описания промышленных объектов представляет собой сложную исследовательскую задачу [1]. Например, корректные методы идентификации, следовательно, и оптимизации таких сложных производств, как доменный процесс, не известны. Кроме того, возникают существенные проблемы при решении задачи свертки отдельных выходных показателей (производительности печи, удельного расхода кокса, параметров, характеризующих химический состав чугуна и т.п.) в обобщенный критерий эффективности изучаемого процесса. Именно поэтому в работе [2] был сделан вывод, что все доменные печи работают не в оптимальных режимах и имеют существенные резервы повышения эффективности по всем выходным показателям.

Для эффективного решения задач изучения и совершенствования действующих производств по информации о значениях входных параметров и выходных показателей, фиксируемых в режиме наблюдения за работой изучаемого технологического процесса, разработаны новые методы идентификации и субоптимизации:

- Метод восстановления одномерных зависимостей (МВОЗ), с помощью которого осуществляется редукция к элементарным свойствам изучаемого процесса – строится модель $Y_j = F_i(X_i)$, $i=1, n$, которая описывает

зависимость выходного показателя Y_j от каждого из n входных параметров X_i .

- Метод синтеза модели субоптимального управления по математической модели, полученной с помощью МВОЗ [3].
- Метод свертки множества выходных показателей (Y_j) в обобщенный критерий ($Y_{общ}$) оценки эффективности изучаемого процесса, измеряемый в дискретных шкалах [3].

В настоящей статье излагается новый метод повышения эффективности действующих технологических процессов по нескольким выходным показателям – метод компромиссной субоптимизации (МКС).

Сущность МКС заключается в следующем.

- С помощью МВОЗ по экспериментальным данным, зафиксированным в режиме наблюдения за технологическим режимом доменной плавки, строятся математические модели зависимости каждого из j выходных показателей от значений каждого из m входных параметров: $Y_1 = F_1(X_i), i=1, n (1), Y_2 = F_2(X_i), i=1, n (2), Y_m = F_m(X_i), i=1, n (n)$. По каждой из этих моделей независимо строятся модели субоптимального управления.
- По полученным моделям субоптимального управления ($1... m$) синтезируют компромиссную модель субоптимального управления.

Алгоритм построения модели компромиссного субоптимального управления, обеспечивающей повышение эффективности работы изучаемого технологического процесса по комплексу заданных выходных показателей, реализуется следующим образом.

1. Полученные модели субоптимального управления по каждому из выходных показателей сравниваются между собой.
2. Если оптимальные поддиапазоны значений для некоторых входных параметров X_i этих моделей совпадают, то они переносятся в модель компромиссного субоптимального управления.
3. Если оптимальные поддиапазоны значений для некоторых входных параметров X_i этих моделей находятся в поддиапазонах D_1 и D_3 , то в модель субоптимального управления переносятся поддиапазоны D_2 этих параметров.
4. Если оптимальные поддиапазоны значений для некоторых входных параметров X_i этих моделей находятся рядом, например, в D_1 и D_2 или в D_2 и D_3 , то формируются новые поддиапазоны, в которых минимальное значение соответствует середине предыдущего, а максимальное значение – середине последующего поддиапазонов.

Ниже, на примере доменной печи № 5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» показана реализация алгоритма компромиссной субоптимизации.

Исходные данные: в табл. 1 приведен экспериментальный материал, полученный в режиме наблюдения за работой доменной печи № 5 с 1 ноября по 31 декабря 2002 г.

Постановка задачи: найти условия проведения технологического режима, обеспечивающие существенное сокращение удельного расхода кокса и шлака.

Наименования и единицы измерения входных параметров X_i в табл. 1 соответствуют аналогичным в табл. 2.

Таблица 1 – Исходный экспериментальный материал по доменной печи № 5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Дата	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	Y1	Y2
01.11.2002	5463.3	0.966	0.021	0.000	3.83	1491.5	0.699	2987	2.57	1037	25.4	1.25	202.4	1.17	468.1	459
02.11.2002	5678.4	0.835	0.131	0.000	3.96	1542.0	0.704	2903	2.56	1007	25.4	1.25	193.6	1.22	489.1	465
03.11.2002	5781.4	0.836	0.148	0.000	4.01	1529.0	0.720	3047	2.64	993	25.8	1.29	200.0	1.16	489.6	498
04.11.2002	4238.5	0.811	0.157	0.000	4.01	1124.0	0.529	2991	2.61	1000	23.8	1.31	135.9	1.19	485.2	492
05.11.2002	5537.4	0.973	0.000	0.000	4.02	1521.3	0.688	3024	2.62	947	24.6	1.28	193.2	1.19	489.2	484
06.11.2002	5862.9	1.000	0.000	0.000	4.12	1519.8	0.712	3039	2.59	1013	25.1	1.25	194.5	1.19	490.9	521
07.11.2002	5872.6	0.982	0.000	0.000	4.07	1670.2	0.722	3019	2.63	1050	25.6	1.25	190.2	1.14	491.0	469
08.11.2002	5218.3	0.918	0.074	0.000	3.96	1397.3	0.662	2996	2.56	1025	24.3	1.25	150.4	1.11	487.6	514
09.11.2002	5777.7	0.800	0.183	0.000	3.95	1509.7	0.731	3027	2.59	1053	25.3	1.26	199.8	1.20	485.0	514
10.11.2002	5453.1	0.786	0.199	0.000	4.20	1441.6	0.649	2921	2.56	1033	25.3	1.25	189.1	1.23	512.5	547
11.11.2002	5111.2	0.903	0.088	0.000	4.04	1332.8	0.633	2964	2.58	1023	24.9	1.26	172.9	1.22	500.3	535
12.11.2002	5301.4	0.702	0.265	0.000	3.64	1514.0	0.728	2928	2.55	980	24.9	1.23	184.4	1.21	493.0	464
13.11.2002	5620.4	0.982	0.000	0.000	3.84	1523.5	0.733	2813	2.50	923	26.0	1.19	160.1	1.24	492.6	492
14.11.2002	5775.5	0.831	0.152	0.005	3.96	1508.1	0.729	2941	2.65	968	26.0	1.26	174.9	1.23	494.0	512
15.11.2002	5956.7	0.862	0.126	0.000	4.09	1519.9	0.728	2939	2.57	1020	25.7	1.26	178.8	1.15	498.8	541
16.11.2002	5448.2	0.879	0.113	0.000	3.85	1513.2	0.732	2917	2.55	1023	26.0	1.26	174.1	1.23	492.0	496
17.11.2002	5824.7	0.973	0.027	0.000	3.91	1550.3	0.748	3061	2.62	1042	26.2	1.26	184.0	1.19	494.3	518
18.11.2002	5675.0	0.934	0.053	0.000	3.90	1519.8	0.728	3028	2.63	986	25.0	1.27	168.2	1.25	495.7	509



Таблица 1 – Продолжение

Дата	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	Y1	Y2
19.11.2002	5214.0	0.800	0.200	0.000	3.79	1480.2	0.688	2882	2.55	990	24.3	1.24	160.6	1.23	521.6	504
20.11.2002	4972.1	0.865	0.120	0.000	3.72	1358.1	0.666	2934	2.52	980	22.2	1.22	154.0	1.26	553.9	544
21.11.2002	4264.0	0.947	0.037	0.000	3.75	1175.1	0.568	2641	2.42	998	23.6	1.17	139.2	1.26	510.5	498
22.11.2002	4788.6	0.943	0.016	0.006	3.73	1290.9	0.646	2717	2.57	1017	25.5	1.18	166.6	1.28	476.2	469
23.11.2002	4880.4	0.947	0.000	0.011	3.63	1400.5	0.672	2607	2.56	1020	26.0	1.21	165.1	1.29	491.9	450
24.11.2002	4599.4	0.952	0.000	0.009	3.99	1189.5	0.576	2571	2.54	1005	26.7	1.17	167.1	1.29	501.2	495
25.11.2002	4433.7	0.900	0.034	0.000	3.99	1233.9	0.555	2607	2.56	860	25.7	1.26	130.3	1.23	555.7	517
26.11.2002	5790.8	0.792	0.159	0.039	3.66	1499.6	0.790	2940	2.73	827	26.1	1.36	145.4	1.17	455.7	472
27.11.2002	5758.3	0.943	0.037	0.000	3.87	1499.4	0.752	3079	2.76	977	25.4	1.42	171.2	1.21	491.4	501
28.11.2002	5820.1	0.856	0.063	0.060	3.84	1558.8	0.758	3010	2.79	1032	25.2	1.44	179.4	1.24	490.2	471
29.11.2002	5624.6	0.681	0.233	0.059	3.75	1578.1	0.750	3064	2.79	1006	24.4	1.43	177.8	1.23	508.6	480
30.11.2002	5645.4	0.772	0.174	0.044	3.81	1501.1	0.740	3174	2.79	1029	23.8	1.43	171.3	1.21	496.1	497
01.12.2002	5429.7	0.799	0.032	0.168	3.58	1532.2	0.758	3150	2.72	1013	24.0	1.43	177.5	1.22	491.7	465
02.12.2002	5645.4	0.799	0.104	0.097	3.81	1525.6	0.741	3043	2.77	987	24.0	1.43	156.8	1.21	496.4	490
03.12.2002	5662.2	0.804	0.056	0.136	3.64	1534.5	0.785	3139	2.80	1033	24.4	1.43	168.8	1.25	489.6	478
04.12.2002	5796.2	0.792	0.114	0.085	3.76	1571.3	0.770	3119	2.79	1027	24.5	1.42	169.9	1.24	498.1	487
05.12.2002	5993.8	0.791	0.107	0.090	3.87	1601.2	0.779	3203	2.81	1047	24.1	1.42	164.2	1.17	498.1	490
06.12.2002	6141.0	0.528	0.345	0.117	3.91	1604.2	0.787	3276	2.78	1063	24.1	1.42	166.8	1.20	497.9	489
07.12.2002	5816.4	0.899	0.023	0.051	3.75	1576.2	0.776	3264	2.81	1065	23.8	1.42	163.5	1.20	492.4	472
08.12.2002	5618.4	0.766	0.122	0.073	3.59	1555.7	0.805	3308	2.68	1056	24.5	1.36	164.1	1.22	497.3	465
09.12.2002	5999.0	0.778	0.205	0.000	3.69	1590.6	0.761	3178	2.75	1038	24.0	1.39	164.1	1.19	511.5	464
10.12.2002	5133.2	0.707	0.263	0.000	3.92	1658.8	0.766	3212	2.74	1037	23.9	1.37	167.4	1.18	507.8	905
11.12.2002	5823.5	0.711	0.266	0.000	3.50	1677.0	0.805	3214	2.68	1011	25.1	1.38	153.3	1.21	513.3	451
12.12.2002	5077.2	0.854	0.097	0.000	3.46	1531.3	0.832	3530	2.67	790	25.4	1.39	164.3	1.23	501.3	470
13.12.2002	5786.2	0.769	0.196	0.000	3.72	1606.0	0.682	3256	2.71	965	24.0	1.39	154.0	1.20	504.8	442
14.12.2002	5707.7	0.787	0.176	0.000	3.90	1516.3	0.742	3260	2.66	987	24.3	1.38	155.6	1.20	495.2	466
15.12.2002	5751.7	0.780	0.198	0.000	3.95	1528.9	0.722	3261	2.72	1023	24.3	1.41	179.7	1.23	489.4	494
16.12.2002	6169.7	0.825	0.163	0.000	3.88	1565.4	0.741	3258	2.68	1031	24.1	1.36	163.9	1.19	500.4	482
17.12.2002	5773.8	0.828	0.122	0.038	3.86	1650.6	0.798	3358	2.69	1058	24.4	1.36	162.0	1.20	499.9	535
18.12.2002	5580.0	0.697	0.174	0.096	3.73	1549.7	0.747	3376	2.49	930	24.2	1.23	151.9	1.22	499.9	461
19.12.2002	5548.0	0.763	0.132	0.072	3.76	1532.5	0.737	3236	2.66	1027	24.6	1.23	154.3	1.20	500.5	460
20.12.2002	5551.0	0.756	0.138	0.092	3.72	1540.4	0.747	3078	2.55	1005	24.7	1.30	155.0	1.23	500.8	468
21.12.2002	5784.8	0.778	0.136	0.058	3.89	1530.3	0.744	3174	2.59	1026	24.4	1.30	169.5	1.20	498.5	480
22.12.2002	5868.5	0.792	0.142	0.056	3.91	1555.2	0.751	3098	2.60	1055	24.5	1.30	161.1	1.18	499.7	497
23.12.2002	5746.4	0.809	0.092	0.092	3.75	1569.7	0.761	3165	2.65	1031	24.4	1.30	164.6	1.22	500.4	482
24.12.2002	5764.8	0.794	0.124	0.073	3.73	1603.7	0.772	3193	2.62	1036	24.3	1.35	163.7	1.27	500.5	466
25.12.2002	4746.2	0.787	0.103	0.103	3.93	1262.0	0.603	3166	2.66	1030	23.9	1.34	130.1	1.20	501.5	489
26.12.2002	5346.1	0.799	0.113	0.077	3.63	1523.9	0.736	3213	2.76	1034	24.5	1.41	155.3	1.19	501.3	457
27.12.2002	5320.6	0.863	0.064	0.064	4.14	1310.7	0.642	3046	2.61	1037	24.9	1.29	161.9	1.21	503.0	535
28.12.2002	5106.8	0.952	0.000	0.041	3.59	1511.5	0.736	3082	2.58	980	24.2	1.28	156.4	1.23	501.5	468
29.12.2002	5532.4	0.988	0.000	0.000	3.87	1473.4	0.714	2983	2.58	973	24.8	1.28	149.2	1.21	503.2	501
30.12.2002	5090.1	0.874	0.066	0.033	3.70	1407.7	0.687	3068	2.60	1020	24.3	1.31	143.8	1.20	500.1	472
31.12.2002	5327.3	0.699	0.185	0.105	3.85	1498.5	0.692	3081	2.59	1005	24.2	1.29	148.4	1.15	501.9	474

Y1 – расход кокса, кг/т чугуна; Y2 – количество шлака, кг/т

Средние значения выходных показателей по данным табл. 1: $Y1_{ср} = 498,4$ кг/т чугуна, $Y2_{ср} = 494,8$ кг/т чугуна.

В соответствии с алгоритмом построения математической модели действующего технологического процесса [3] по экспериментальным данным, приведенным в табл. 1, каждая строка которой содержит информацию

о среднесуточных значениях входных параметров и соответствующих им удельному расходу кокса и количеству шлака, осуществляется:

1. Сортировка табл. 1 по возрастанию параметра X1.
2. Деление диапазона вариации значений параметра X1 на 3 поддиапазона из условия попадания в каждый

поддиапазон одинакового (примерно одинакового) количества строк табл. 1 (табл. 2).

3. Определение средних значений X_i в каждом из трех поддиапазонов и соответствующих им средних значений каждого из выходных показателей.

4. Повторение пунктов 1–3 последовательно для каждого из n входных параметров в таблице.

Таблица 2 – Деление диапазонов вариации входных параметров на 3 поддиапазона

Входной параметр (X_i), единицы измерения	$X_i \min$	Граница 1	Граница 2	$X_i \max$
X1 – Железородная часть шихты (ЖРЧШ), т/сут	4238.5	5439.0	5769.3	6169.7
X2 – Доля агломерата КМК в ЖРЧШ	0.528	0.792	0.870	1.000
X3 – Доля агломерата НКГОК в ЖРЧШ	0.000	0.065	0.145	0.345
X4 – Доля окатышей в ЖРЧШ	0.000	0.003	0.054	0.168
X5 – Рудная нагрузка	3.46	3.74	3.91	4.20
X6 – Расход кокса, т/сут	1124.0	1504.6	1541.2	1677.0
X7 – Интенсивность по коксу	0.529	0.713	0.748	0.832
X8 – Расход дутья, м ³ /мин	2571	3003	3166	3530
X9 – Давление дутья (P), ати	2.42	2.59	2.68	2.81
X10 – Температура дутья (T), °C	790	1003	1031	1065
X11 – Содержание O ₂ в дутье, %	22.2	24.3	25.1	26.7
X12 – Давление колошникового газа, ати	1.17	1.26	1.37	1.44
X13 – Расход природного газа, тыс. м ³ /сут	130.1	160.4	170.6	202.4
X14 – Основность шлака	1.11	1.20	1.23	1.29

С помощью приведенного выше алгоритма идентификации изучаемого процесса для каждого из выходных показателей (Y_k) определяются координаты трех точек (рассчитываются значения $X_{i \text{cp}D1}$, $Y_{\text{cp}D1}$; $X_{i \text{cp}D2}$, $Y_{\text{cp}D2}$; $X_{i \text{cp}D3}$, $Y_{\text{cp}D3}$), по которым можно построить математическую модель зависимости для каждого из n входных параметров

$$Y_k = F_i(X_i), i=1, n. \quad (1)$$

В табл. 3 приведены средние значения каждого из n входных параметров в 1-ом, 2-ом и 3-ем поддиапазонах и соответствующие им средние значения удельного расхода кокса.

В табл.4 приведены средние значения каждого из n входных параметров в 1-ом, 2-ом и 3-ем поддиапазонах и соответствующие им средние значения удельного количества шлака.

В 1-ый поддиапазон попадают значения от $X_i \min$ до 1-ой границы, во 2-ой – от 1-ой до 2-ой границы, в 3-ий – от 2-ой границы до $X_i \max$.

Для каждого входного параметра по координатам 3-ех точек, приведенных в табл. 3, 4 можно построить графические или восстановить аналитические зависимости $Y = F_i(X_i)$.

В табл. 3, 4 жирным шрифтом выделены поддиапазоны, в которых средние значения удельного расхода кокса и количества шлака минимальны.

С помощью табл. 3 и 4 можно определить резерв повышения эффективности работы процесса по удельному расходу кокса и количеству шлака для каждого из входных параметров X_i . Этот резерв определяется как разность между средним значением выходного показателя в

Таблица 3 – Расчет исходных данных для построения модели зависимости удельного расхода кокса (кг/т чугуна) от параметров доменной плавки

Наименование входного параметра, единицы измерения	Среднее значение входного параметра X_i в поддиапазоне			Среднее значение Y_1 - (расхода кокса, кг/т чугуна) в поддиапазоне		
	$X_i \text{ cp}D1$	$X_i \text{ cp}D2$	$X_i \text{ cp}D3$	$Y \text{ cp}D1$	$Y \text{ cp}D2$	$Y \text{ cp}D3$
X1 – Железородная часть шихты (ЖРЧШ), т/сут	4980	5620	5871	504.4	495.6	495.2
X2 – Доля агломерата КМК в ЖРЧШ	0.739	0.820	0.943	501.5	497.5	496.3
X3 – Доля агломерата НКГОК в ЖРЧШ	0.023	0.113	0.202	496.0	500.8	498.2
X4 – Доля окатышей в ЖРЧШ	0.000	0.028	0.089	500.5	490.9	498.8
X5 – Рудная нагрузка	3.65	3.83	4.00	499.1	497.8	498.3
X6 – Расход кокса, т/сут	1368	1523	1592	500.9	494.6	499.8
X7 – Интенсивность по коксу	0.648	0.733	0.775	502.3	495.9	497.0
X8 – Расход дутья, м ³ /мин	2859	3070	3256	499.2	495.7	500.4
X9 – Давление дутья (P), ати	2.55	2.62	2.75	502.5	495.9	496.8
X10 – Температура дутья (T), °C	952	1018	1043	501.5	496.6	497.0
X11 – Содержание O ₂ в дутье, %	23.9	24.5	25.7	503.0	498.8	494.0
X12 – Давление колошникового газа, ати	1.22	1.30	1.41	498.8	497.9	498.7
X13 – Расход природного газа, тыс. м ³ /сут	149.0	165.1	184.4	503.1	499.2	492.8
X14 – Основность шлака	1.17	1.21	1.25	492.4	497.9	503.7



Таблица 4 – Расчет исходных данных для построения модели зависимости удельного количества шлака (кг/т чугуна) от параметров доменной плавки

Наименование входного параметра, единицы измерения	Среднее значение входного параметра X_i в поддиапазоне			Среднее значение Y_2 - (колич. шлака, кг/т чугуна) в поддиапазоне		
	$X_{i\text{cpD1}}$	$X_{i\text{cpD2}}$	$X_{i\text{cpD3}}$	$Y_{2\text{cp. D1}}$	$Y_{2\text{cp. D2}}$	$Y_{2\text{cp. D3}}$
X1 – Железородная часть шихты (ЖРЧШ), т/сут	4980	5620	5871	510.9	483.9	490.3
X2 – Доля агломерата КМК в ЖРЧШ	0.739	0.820	0.943	499.3	493.5	492.0
X3 – Доля агломерата НКГОК в ЖРЧШ	0.023	0.113	0.202	488.6	490.6	505.4
X4 – Доля окатышей в ЖРЧШ	0.000	0.028	0.089	508.3	484.2	479.2
X5 – Рудная нагрузка	3.65	3.83	4.00	468.1	487.5	525.3
X6 – Расход кокса, т/сут	1368	1523	1592	498.3	487.0	499.5
X7 – Интенсивность по коксу	0.648	0.733	0.775	495.3	486.6	502.9
X8 – Расход дутья, м ³ /мин	2859	3070	3256	498.4	489.6	496.8
X9 – Давление дутья (P), ати	2.55	2.62	2.75	494.4	490.4	499.4
X10 – Температура дутья (T), °C	952	1018	1043	489.3	485.9	509.8
X11 – Содержание O ₂ в дутье, %	23.9	24.5	25.7	507.2	488.4	491.8
X12 – Давление колошн. газа, ати	1.22	1.30	1.41	488.3	496.2	498.4
X13 – Расход природного газа, тыс. м ³ /сут	149.0	165.1	184.4	481.4	505.9	496.5
X14 – Основность шлака	1.17	1.21	1.25	513.9	484.0	491.2

исходном экспериментальном материале и средним его значением в оптимальном поддиапазоне.

Например, параметр X1 находится в оптимальном поддиапазоне D3 по удельному расходу кокса (табл. 3). Средний расход кокса в этом поддиапазоне – 495,2 кг/т чугуна. В исходном экспериментальном материале средний расход кокса равен 498,4 кг/т чугуна, т.е. резерв по удельному расходу кокса для параметра составляет $498,4 - 495,2 = 3,2$ кг/т чугуна.

Параметр X4 находится в оптимальном поддиапазоне D3 по количеству шлака на тонну чугуна (табл. 4). Среднее количество шлака при X4D3 – 479,2 кг/т чугуна. Среднее количество шлака по всей таблице исходного материала – 494,8 кг/т чугуна, т.е. резерв по сокращению количества шлака составляет $494,8 - 479,2 = 15,6$ кг/т чугуна.

В соответствии с алгоритмом построения математической модели субоптимального управления изучаемым технологическим процессом [3] для каждого параметра X_i выбирается тот поддиапазон значений, которому соответствует лучшее среднее значение выходного показателя.

Модель субоптимального управления технологическим режимом доменной плавки, обеспечивающая существенное сокращение удельного расхода кокса, имеет следующий вид:

$Y_1 \rightarrow Y_{\min}$, если:

$$X_{1D3} * X_{2D3} * X_{3D1} * X_{4D2} * X_{5D2} * X_{6D2} * X_{7D2} * X_{8D2} * X_{9D2} * X_{10D2} * X_{11D3} * X_{12D2} * X_{13D3} * X_{14D2}. \quad (2)$$

Модель субоптимального управления технологическим режимом доменной плавки, обеспечивающая существенное сокращение удельного количества шлака имеет следующий вид:

$$Y_2 \rightarrow Y_{\max}, \text{ если: } X_{1D2} * X_{2D3} * X_{3D1} * X_{4D3} * X_{5D1} * X_{6D2} * X_{7D2} * X_{8D2} * X_{9D2} * X_{10D2} * X_{11D2} * X_{12D1} * X_{13D1} * X_{14D2}. \quad (3)$$

В моделях (2) и (3) жирным шрифтом выделены те параметры, для которых оптимальные поддиапазоны значений совпадают.

Сравнение моделей (2) и (3) показывает, что для 8 параметров из 14 оптимальные поддиапазоны значений совпадают. Кроме того, в этих моделях имеется всего лишь 1 параметр (X13), для которого оптимальными являются во 2-ой модели 3-ий, а в 3-ей – 1-ый поддиапазоны.

Для построения модели компромиссного субоптимального управления изучаемым процессом, обеспечивающим сокращение удельных затрат кокса и шлака, выбраны:

1. Для параметров, в которых оптимальные поддиапазоны совпадают в моделях субоптимального управления (2) и (3): **X2D3, X3D1, X6D3, X7D3, X8D3, X9D3, X10D3, X14D2** (значения соответствующих им поддиапазонов приведены в табл. 2)

2. Для тех параметров, в которых оптимальные поддиапазоны в моделях (2) и (3) находятся рядом: 1-ый по одному критерию и 2-ой – по другому или 2-ой поддиапазон по одному критерию и 3-ий – по другому; выбираются компромиссные значения входных параметров – от се-

редины меньшего поддиапазона до середины большего. Средние значения для каждого X_i в поддиапазонах 1, 2 и 3 приведены в табл. 3, 4.

В табл. 5 приведены рекомендации по поддиапазонам значений всех входных параметров, с помощью которых обеспечивается компромиссное субоптимальное управление процессом доменной плавки, существенно сокращающее расход кокса и количества получаемого шлака.

Таблица 5 – Рекомендуемые поддиапазоны значений X_i , полученные с помощью компромиссной субоптимизации по моделям субоптимального управления (2) и (3)

Наименование входного параметра, единицы измерения	X_i min	X_i max
X1 – Железородная часть шихты (ЖРЧШ), т/сут	5620	5871
X2 – Доля агломерата КМК в ЖРЧШ	0.870	1.000
X3 – Доля агломерата НКГОК в ЖРЧШ	0.000	0.065
X4 – Доля окатышей в ЖРЧШ	0.028	0.089
X5 – Рудная нагрузка	3.65	3.83
X6 – Расход кокса, т/сут	1541.2	1677.0
X7 – Интенсивность по коксу	0.748	0.832
X8 – Расход дутья, м ³ /мин	3166	3530
X9 – Давление дутья (P), ати	2.68	2.81
X10 – Температура дутья (T), °C	1031	1065
X11 – Содержание O ₂ в дутье, %	24.5	25.7
X12 – Давление колошникового газа, ати	1.22	1.30
X13 – Расход природного газа, тыс. м ³ /сут	160.4	170.6
X14 – Основность шлака	1.20	1.23

Оценка эффективности предлагаемого метода компромиссной субоптимизации

1. При построении модели $Y_k = F_i(X_i)$, $i=1, n$ происходит разделение диапазона вариации значений каждого из n входного параметра (X_i) на 3 поддиапазона из условия попадания в каждый поддиапазон одинакового (примерно одинакового) количества опытов из таблицы исходного экспериментального материала, т.е для каждого из входных параметров (X_i) существует поддиапазон значений, которому соответствует худшее среднее значение по каждому из выходных показателей. В этом поддиапазоне содержится приблизительно 1/3 строк.

В соответствии с алгоритмом построения модели компромиссной субоптимизации (табл. 5) в полученной модели не будет ни одного параметра с худшим средним значением ни по одному из выходных показателей. Следовательно, повысится эффективность работы изучаемого процесса по всем выходным показателям.

2. Еще более существенное повышение эффективности работы изучаемого процесса будет достигнуто за

счет того, что входные параметры, для которых совпадают «лучшие» поддиапазоны значений по всем выходным показателям, будут поддерживаться в «лучших» поддиапазонах. В табл. 6 приведены резервы по сокращению расхода кокса и количества шлака на тонну чугуна по таким параметрам. Для каждого из этих параметров резерв ($\Delta RY1$ и $\Delta RY2$) определялся как разность между средними значениями выходных показателей в исходном материале (табл. 1) и средними их значениями в лучших поддиапазонах ($Y1_{ср. Допт}$ и $Y2_{ср. Допт}$).

Таблица 6 – Оценка возможностей сокращения расхода кокса и количества шлака (кг/т чугуна) за счет использования новых методов идентификации (метод восстановления одномерных зависимостей) и оптимизации (метод компромиссной субоптимизации)

Наименование входного параметра	Среднее значение $Y1$ в оптимальном поддиапазоне		Среднее значение $Y2$ в оптимальном поддиапазоне	
	$Y1_{ср. Допт}$	$\Delta RY1$	$Y2_{ср. Допт}$	$\Delta RY2$
X2 – Доля агломерата КМК в ЖРЧШ	496.3	2.1	492.0	2.8
X3 – Доля агломерата НКГОК в ЖРЧШ	496.0	2.4	488.6	6.2
X6 – Расход кокса	494.6	3.8	487.0	7.8
X7 – Интенсивность по коксу	495.9	2.5	486.6	8.2
X8 – Расход дутья	495.7	2.7	489.6	5.2
X9 – Давление дутья (P)	495.9	2.5	490.4	4.4
X10 – Температура дутья	496.6	1.8	485.9	8.9
X14 – Основность шлака	497.9	0.5	484.0	10.8

$Y1$ ср. – среднее значение удельного расхода кокса во всех строках табл. 6 = 498.4 кг/т чугуна.

$Y2$ ср. – среднее значение количества шлака во всех строках табл. 6 = 494.8 кг/т чугуна

В столбце $Y1_{ср. Допт}$ (табл. 6) – приведены средние значения удельного расхода кокса в оптимальных поддиапазонах тех строк, в которых оптимальные поддиапазоны значений входных параметров X_i в моделях субоптимального управления 2 и 3 совпадают.

В столбце $Y2_{ср. Допт}$ (табл. 6) – приведены средние значения количества шлака в оптимальных поддиапазонах тех строк, в которых оптимальные поддиапазоны значений входных параметров X_i в моделях субоптимального управления 2 и 3 совпадают.

В столбце $\Delta RY1 (X_i)$ приведены значения величины резерва по сокращению удельного расхода кокса по каждому из параметров X_i (табл. 6).



Суммарный резерв R1 по удельному расходу кокса равен сумме резервов по каждому из параметров и составит 18,3 кг/т чугуна.

В столбце **ΔRY2 (Xi)** приведены значения величины резерва по сокращению количества шлака по каждому из параметров **Xi** (табл. 6).

Суммарный резерв R2 по удельному количеству шлака равен сумме резервов по каждому из параметров и составит 54,3 кг/т чугуна.

Таким образом, после идентификации и совершенствования технологического режима в доменной печи № 5 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с помощью методов восстановления одномерных зависимостей и компромиссной субоптимизации ожидается сокращение расхода кокса на 18,3 кг/т чугуна (снижение энергозатрат – 3,7 % отн.) и сокращение количества шлака (образования отходов) на 54,3 кг/т чугуна (11,0 % отн.)

В качестве примера приведем также результаты аналогичной работы, проведенной для доменной печи № 3 ОАО «ДМЗ им. Петровского». В этой работе решалась проблема одновременного сокращения расхода кокса (энергосбережения) и повышения производительности печи. В исходных данных средний расход кокса составлял 597,2 кг/т чугуна, а средняя производительность – 1489,6 т чугуна/сут. По данным завода, после внедрения рекомендаций, полученных с помощью метода компромиссной субоптимизации, в сентябре 2007 г. расход кокса снижен до 579 кг/т чугуна при одновременном росте

производительности печи до 1699 т/сут. В октябре удельный расход кокса достиг 552 кг/т чугуна (сократился на 7,6 % отн.), а среднесуточное производство печи – 1678 т чугуна (возросло на 12,6 %).

На приведенных примерах отчетливо показано, что метод компромиссной субоптимизации позволяет решать вопросы повышения эффективности действующих технологических процессов одновременно по нескольким выходным показателям, что может быть весьма полезным при решении вопросов не только повышения экономической эффективности, энергосбережения, но и защиты окружающей природной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бородюк, В. П.** Статистическое описание промышленных объектов [Текст] / В. П. Бородюк, Э. К. Лецкий. – М. : Энергия, 1971. – 111 с.
2. **Кац, М. Д.** Математическое моделирование и оптимизация технологического режима доменной плавки по информации, фиксируемой в режиме нормальной эксплуатации [Текст] / М. Д. Кац, А. М. Давиденко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2007. – № 3. – С. 15–20.
3. **Давиденко, А. М.** Новые методы изучения действующих производств и их возможности [Текст] / А. М. Давиденко, М. Д. Кац // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2004. – № 6. – С. 189–193.

Поступила в редакцию 01.09.2008

У статті наведено новий підхід до підвищення ефективності діючих технологічних процесів відразу за декількома вихідними показниками. Для вирішення цього завдання розроблено метод компромісної субоптимізації. Наводиться алгоритм реалізації цього методу. На прикладі доменної печі № 5 «АрселорМіттал Кривий Ріг» показана ефективність запропонованого методу при рішенні задачі субоптимізації технологічного режиму доменної плавки з метою одночасного скорочення витрати коксу та кількості шлаку на тону чавуну, що дозволить знизити енергоспоживання та забруднення довкілля.

The article informs about the new approach to increase technological processes efficiency simultaneously on several out parameters. The method of compromise suboptimization was developed to solve this problem. The algorithm of realizing the method is resulted. Efficiency of the proposed method is shown by the example of the blast furnace No.5 at «Krivorozhstal» during solving the problem of suboptimizing blast-furnace melting practice with the purpose of simultaneous decreasing coke and slag rate per 1 ton of pig-iron that enables lowering energy consumption and environment pollution.