

Зимова школа з системного аналізу і штучного інтелекту

ДЕНЬ 2. ЗАДАЧА 4

Системний аналіз та оптимізація витрат оборотного лому при виробництві сталі

Дніпро
2024

- ***Об'єкт дослідження:*** технологічний процес виробництва сталі
- ***Мета:*** розробка математичного та програмного забезпечення оптимального розподілення оборотного лому при виплавці сталі у мартенівських печах з метою мінімізації витрат енергоресурсів

Вихідні дані

- 1) **Статистичні дані**, що містять наступну інформацію
 - день;
 - марка сталі;
 - номенклатурний номер сталі, що виплавляється;
 - час початку плавки і час її закінчення;
 - вага шихти, вага оборотного лому; ВЧМ; чавуну, антрациту, інших складових;
 - інше.
- 2) План, у якому вказана **кількість та найменування марок сталі, які необхідно виготовити**;
- 3) **Кількість оборотного лому, яку виділяють на виконання цього плану.**

№ вагона	Продол	Кто выг	Вес пл	Марка стал	Железо, т	Железо, т	Железо, т	Всего ж	Всего ж	Чугун	Антрац	Брикеты	Извести	Пакеты	Стружки	Ср вес	№ вагона па	№ вагон	Скrap Б	№ вагон	% ВЧМ
2220	8:20	Емченко	198,2	2КП	44,5	86	102,09	125	146,59	70,56		2,7	12/10,15	25,87	24,41	1,173	496,868		5,92	811	709
2221	8:40	Цыкалов	198,0	2КП	62,85	80	83,39	142	146,24	71,52		2,78	9/7,62	15,78	9,41	1,030	890	887			579
2222	8:40	Сурков	200,0	2КП	81,29	60	65	128	146,29	70,24		3,96	12/10,8		20,58	1,143			5,16	736	449
3170	9:20	Емченко	202,3	R7 КП	19,48	113	126,56	131	146,04	70,03		2,8	12/11,17	33,12	19,48	1,115	746,757,810				879
3171	9:00	Сурков	194,0	1КП	34,82	99	111,9	131	146,72	71,39		2,8	12/11,13		18,75	1,120					769
4151	8:20	Емченко	219,0	Д 9"	109,05	69	67,21	126	176,26	69,21		3,99	12/10,38		14,34	1,399			5,92	811	389
4152	9:00	Цыкалов	215,0	12Г2МБТ	86,68	96	90,15	171	176,83	70,17			9/7,86	33,52	21,68	1,034	800,752,857				519
4153	10:00	Емченко	218,0	18Г2 11"	47,64	110	128,9	151	176,54	69,78		0,9	12/11,02		27,12	1,169					739
2223	8:40	Емченко	202,4	2КП	77,24	54	69,71	123	146,95	70,01		3,1	9/8,06	34,79	22,08	1,195	746,816				479
2224	8:20	Цыкалов	202,0	2КП	18,13	119	128,76	128	146,89	70,53		3,2	12/11,2	29,89	13,86	1,148	830,851				889
2225	8:20	Ткаченко	198,0	2КП	67,94	86	78,96	149	146,9	70,4		2,51	9/6,95	18,23	26,43	0,986	891,842		7,35	405	549
3172	8:40	Емченко	206,6	2КП	71,5	56	75,42	119	146,92	48,23		2,6	12/10,97	40,74	23,71	1,235	825,831,496		5,16	736	519
3173	8:40	Цыкалов	190,0	2КП	51,15	101	95,23	143	146,38	70,49		1,46	12/10,68	36,95	16,31	1,024	744,785,735,803		5,17	405	659
3174	9:30	Ткаченко	200,0	2КП	47,79	93	99,18	132	146,97	69,79		2,56	12/11,05		19,28	1,113					679
4154	8:40	Цыкалов	218,3	ст.35 12"	104,58	60	71,5	144	176,08	48,24		3	12/11,02		10,19	1,223			4,98	731	419
4155	8:40	Ткаченко	219,0	Д 9"	115,35	52	60,87	132	176,22	45,12		2,61	9/8,26	12,45	17,49	1,335	804				359
2226	8:35	Емченко	194,0	2КП	24,3	108	122	135	146,3	70,28		3,44	9/8,16	9,51	18,07	1,084	792		4,33	867	839
2227	8:40	Цыкалов	194,0	2КП	34,28	104	111,71	131	145,99	70,03		2,48	12/10,58	51,84	23,83	1,114	735,775,825,822,851				779
2228	8:30	Плотой	198,0	2КП	81,09	59	65,25	125	146,34	70,57		3,42	12/10,44	26,07	23,8	1,171	746,757				459
3175	8:10	Емченко	206,6	2КП	129,79	21	17,06	108	146,85	70,94		2,4	12/10,34		24,79	1,360					129
3176	8:20	Цыкалов	194,0	2КП	38,72	118	107,55	148	146,27	70,24		3,06	12/10,34	15,19	20,49	0,988	830	740			749
3177	8:25	Ткаченко	206,0	2КП	81,33	78	65,71	147	147,04	69,44		3,38	12/10,26		20,6	1,000					459
4156	8:55	Емченко	218,0	ст.20 11"	79,22	72	96,98	128	176,2	69,61		1,5	9/6,97	37,43	20,04	1,377	746,816				559
4157	9:00	Цыкалов	213,0	P235TR2	115,98	71	59,8	175	175,78	70,21			15/14,03		23,3	1,004					349
4158	9:05	Ткаченко	219,4	09Г2С	60,47	88	115,74	141	176,21	71,24		2,56	12/9,96	38,12	19,67	1,250	831,848		4,15	800	669
2229	8:55	Цыкалов	206,6	2КП	88,97	45	57,53	114	146,5	71,59		2,5	9/7,56	18,03	9,71	1,285	816				399
2230	9:15	Ткаченко		2КП	84,77	63	61,42	140	146,19	69,29		2,25	12/9,8	29,89	29,3	1,044	882,897,496				429
3178	8:55	Плотой	197,0	32ХА 11"	37,36	99	108,42	138	145,78	71,79			12/10,02	52,42	10,31	1,056	857,449,877,87	810,825	7,03	872	749
3179	8:40	Цыкалов	205,0	R7 КП	146,78			102	146,78	71,04		2,1	12/9,83		29,21	1,439		805			09

Відбір даних для моделювання

- Проаналізовано частоту виплавки сталі всіх марок, виявлені ті марки сталі, що найчастіше здійснюються (рис.1)

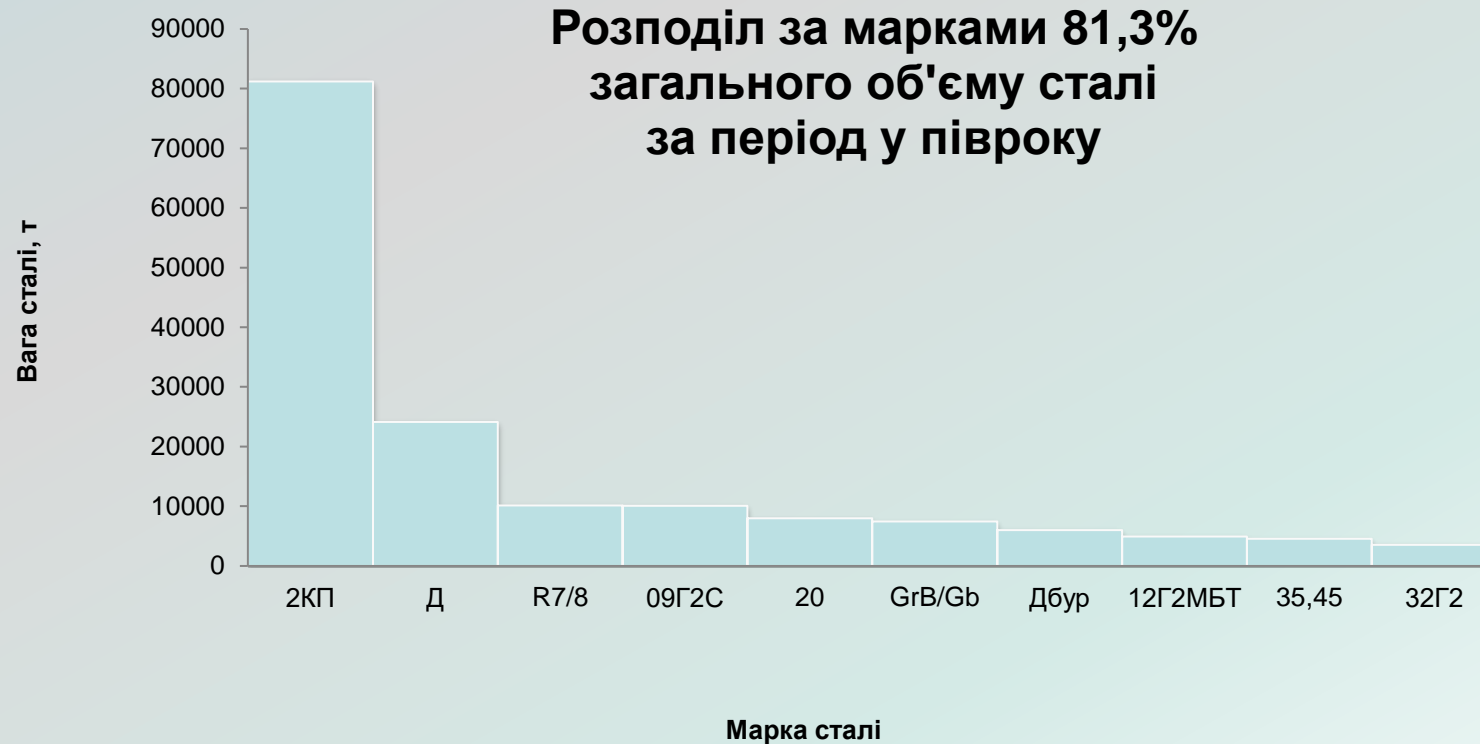


Рис. 1 Діаграма частот виплавки сталі за її марками

- Проведене сортування даних за марками сталі (рис. 2)

Продол. пл	Марка сталі	Железо, му	Железо, тн	Железо, му	Железо, тн	Всього желе	Всього желе	Чугун	Бой чугуна	Ср вес	%ВЧМ
8:50	Д 9"	131	157,43	9	19,11	140	176,54	70,19		1,261	10,8%
9:00	Д 12"	122	142,29	30	34	152	176,29	71,66		1,160	19,3%
8:35	Д 9"	102	139,29	36	37,52	138	176,81	46,17	23,69	1,281	21,2%
8:50	Д 12"	102	133,35	36	43,03	138	176,38	69,12		1,278	24,4%
9:00	Д 9"1750в	108	130,41	45	45,62	153	176,03	71,18		1,151	25,9%
9:15	Д 9"	139	125,58	39	51,2	178	176,78	70,78		0,993	29,0%
9:15	Д - 9"	87	122,29	53	53,94	140	176,23	69,07		1,259	30,6%
9:15	Д 9"	90	116,64	47	60,21	137	176,85	45,57	25,41	1,291	34,0%
9:05	Д 9"	71	115,95	62	60,09	133	176,04	71,91		1,324	34,1%
9:10	Д 9"	80	116,03	66	60,55	146	176,58	71,22		1,209	34,3%
8:50	Д 12"	81	115,7	62	60,97	143	176,67	71,11		1,235	34,5%
9:55	Д 9"	80	100,11	51	60,42	131	160,53	83,18		1,225	37,6%
9:55	Д 9"	63	108,18	66	68,51	129	176,69	70,04		1,370	38,8%
8:30	Дсел 12"	72	82,74	44	63,86	116	146,6	69,35		1,264	43,6%
9:40	Д 9"	87	99,53	56	77,18	143	176,71	70,26		31,000	43,7%
8:20	Дсел 12"	58	79,97	72	66,72	130	146,69	70,49		1,128	45,5%
9:45	Д 9"	72	76,83	74	83,65	146	160,48	80,14		1,099	52,1%
9:15	Д 12"	66	77,15	75	89,6	141	166,75	47,04	33,18	1,183	53,7%
8:55	Д 12"	63	75,52	77	90,79	140	166,31	80,61		1,188	54,6%
8:50	Дсел 12"	42	59,75	81	76,67	123	136,42	80,11		1,109	56,2%
10:00	Д 9"	54	66,95	90	109,59	144	176,54	53,24	16,92	1,226	62,1%
9:20	Д 9"	36	59,55	113	117,13	149	176,68	69,13		1,186	66,3%
11:00	Д 9"	36	36,87	106	123,74	142	160,61	85,5		1,131	77,0%
9:15	Д 9"	33	36,71	106	130,05	139	166,76	81,09		1,200	78,0%
9:25	Д 9"	36	38,23	128	137,94	164	176,17	70,64		1,074	78,3%
9:15	Д 9"	12	36,34	133	140,43	145	176,77	69,98		1,219	79,4%
9:35	Д 9"	27	33,31	132	132,25	159	165,56	49,03	21,03	1,041	79,9%
9:45	Д 9"	21	30,34	119	146,27	140	176,61	69,85		1,262	82,8%

Рис. 2. Вихідні дані за маркою сталі «Д»

- Аналізуючи отримані дані було виявлено, що **тривалість плавки суттєво залежить від частки оборотного лому у шихті.**
- Була висунута **гіпотеза про нормальний розподіл генеральної сукупності.** За допомогою **методу спрямлених діаграм** ця гіпотеза була підтверджена.
- Знайдена **оцінка генеральної середньої і середньо квадратичного відхилення.** Виявлено, що абсолютна величина відхилення майже усіх спостережуваних даних від їх середньої не перевищує потрійного середньо квадратичного відхилення, що **за правилом 3-х сігм** також свідчить про нормальний розподіл вибіркової сукупності.
- Спостереження, що не задовольняють вказаному правилу, були відкинуті. Інформація про всі такі плавки проаналізована щодо причин виникнення таких даних: вивчалися рапорти сталеварів про процес певної плавки (рис. 3)

Пл.3421 В завалке легковесное железо
Пл.5434. В завалке 0:30 - прогрев шихты, в
плавлении сдерживалась 0:40 из-за невозможности
постановки канавы в разл.пролет-запечатана
канавы(пл.3419 потери 4тн.)

Рис. 3. Фрагмент рапорту сталевара

- Для подальших досліджень з наведених даних отримали найбільш суттєві для побудови математичної моделі: марка сталі; частка оборотного лому та ВЧМ у шихті; тривалість плавки (рис.4)

Марка с	ВЧМ, %	Об.лом	Доля В	Доля о	Продол
ст20 11"	38,3%	61,7%	0,383	0,617	529
ст.20 9"	55,2%	44,8%	0,552	0,448	541
20 11"	6,0%	94,0%	0,060	0,940	550
20 11"	12,0%	88,0%	0,120	0,880	550
20 11"	75,1%	24,9%	0,751	0,249	555
ст20 12"	24,7%	75,3%	0,247	0,753	535
20 11"	2,0%	98,0%	0,020	0,980	555
20 12"	48,9%	51,1%	0,489	0,511	535
20 11"	23,6%	76,4%	0,236	0,764	545
20 12"	35,1%	64,9%	0,351	0,649	530
20 - 11"	11,0%	89,0%	0,110	0,890	550
20 - 11"	55,4%	44,6%	0,554	0,446	545
20 - 11"	15,0%	85,0%	0,150	0,850	545
20 9"1900в	34,0%	66,0%	0,340	0,660	535
20 12"	53,6%	46,4%	0,536	0,464	541
20 11"вст	81,2%	18,8%	0,812	0,188	570
ст.20 11"	79,5%	20,5%	0,795	0,205	562
20 11"	49,2%	50,8%	0,492	0,508	538
20 11"вст	95,0%	5,0%	0,950	0,050	570
ст.20 11"	91,0%	9,0%	0,910	0,090	570

Рис. 4. Вихідні дані для побудови функціональної залежності тривалості плавки від частки оборотного лому

Постановка задачі

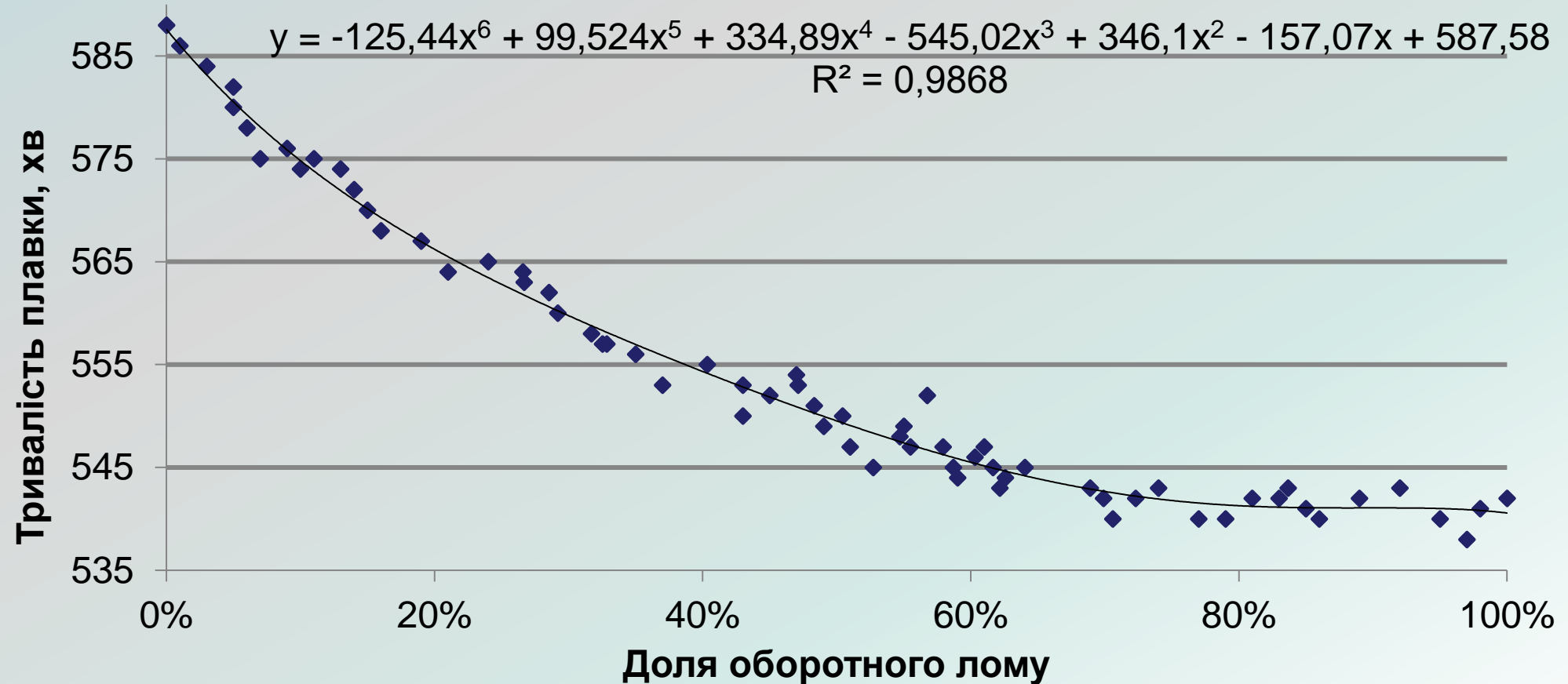
1) Для кожної марки сталі відновити функціональну залежність, яка відображає тривалість плавки від долі оборотного лому у ковші (*час виробництва будь-якої марки сталі залежить від співвідношення кількості оборотного лому до загальної кількості лому у ковші*).

2) Побудувати і реалізувати математичну модель задачі розподілу кількості оборотного лому (яка виділяється на план) між плавками (за планом) так, аби мінімізувати сумарну тривалість усіх плавок

3) Проаналізувати отримані результати

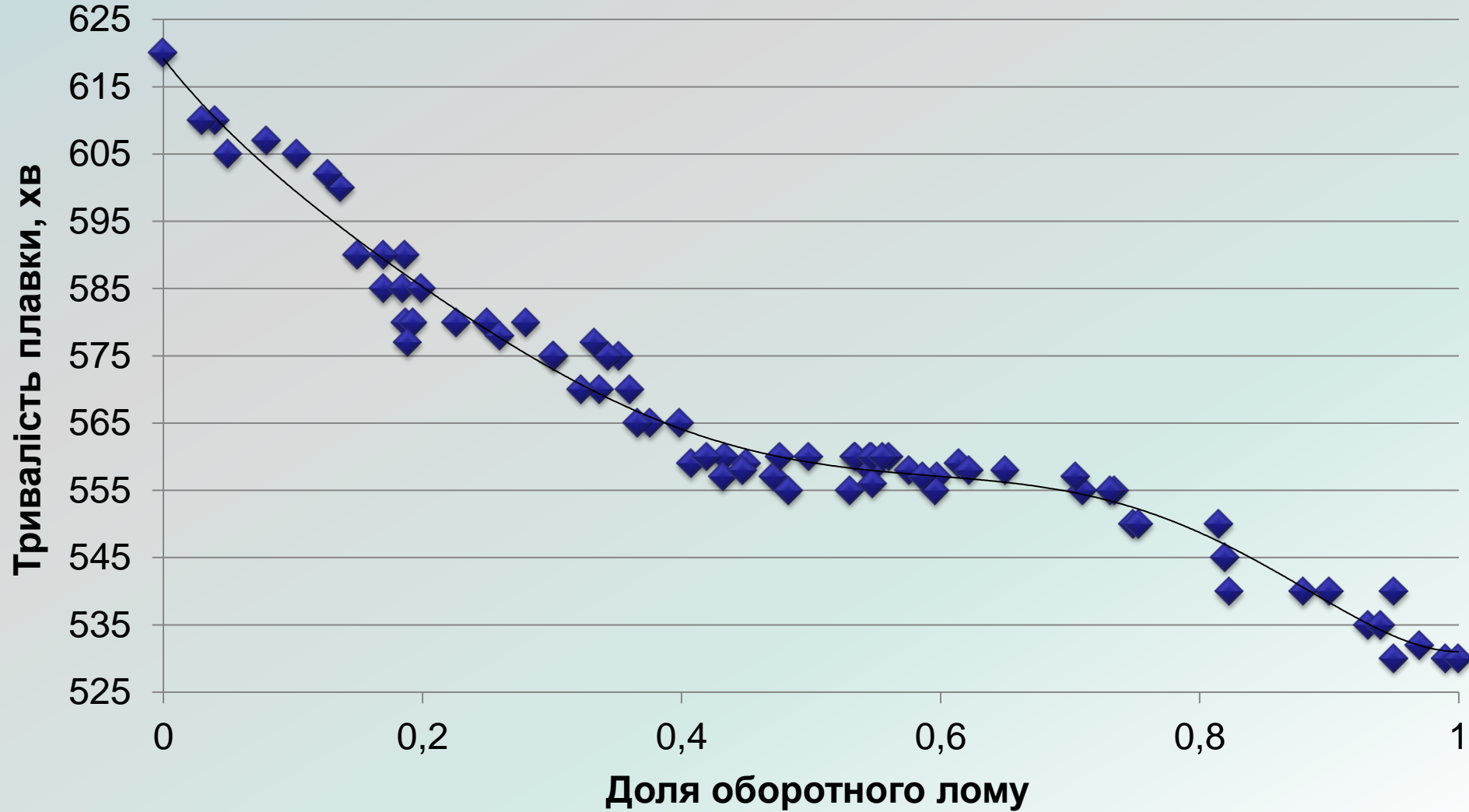
Побудова функціональної залежності

Марка сталі Д бур

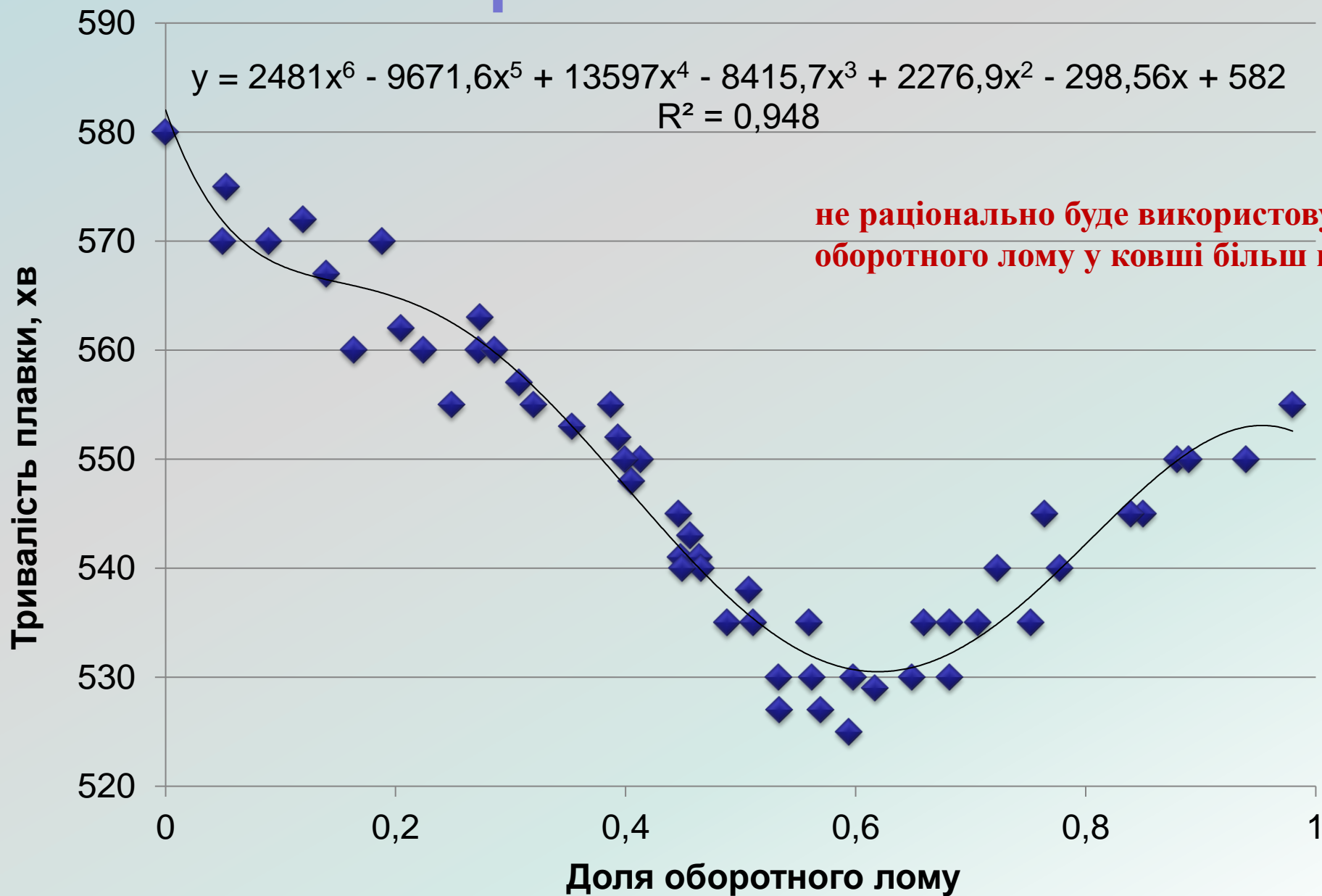


Марка сталі «09Г2С»

$$y = 2388,9x^6 - 6532,8x^5 + 6414,6x^4 - 2854,9x^3 + 741,37x^2 - 245,22x + 619,18$$
$$R^2 = 0,9728$$



Марка стали «ст 20»



Відновлена функціональна залежність

$$F = \sum_{i=1}^I \sum_{j=0}^l a_{ij} (x_i)^j$$

$$A = \{a_{ij}\}_{I \times l}$$

– матриця коефіцієнтів многочлена порядку l , який апроксимує залежність тривалості i -ої плавки від доли оборотного лому у шихті

Математична модель

$$\left\{ \begin{array}{l} F = \sum_{i=1}^I f_i(x_i) \rightarrow \min_{z \in R^I} \\ x_i = \frac{Mz_i}{S_i}, \quad i = \overline{1, I} \\ Mz_i \leq S_i \\ \sum_{i=1}^I z_i = 1, \quad z_i \geq 0 \end{array} \right.$$

K – кількість видів марок сталі, яку виготовляє завод

M – кількість оборотного лому, яка виділяється на план

S_i – максимальна кількість лому у ковші для i плавки

x_i – доля оборотного лому (від M) у шихті i -ої плавки

$I = p_1 + p_2 + \dots + p_K$ – загальна кількість плавок за планом

$z_i, i = 1, \dots, I$ – шуканий розподіл виділеного лому між плавками

Здійснено перехід від задачі умовної
оптимізації до задачі безумовної
оптимізації

$$\begin{aligned} \bar{F} = & \sum_{i=1}^I \sum_{j=0}^l a_{ij} \left(\frac{Mz_i}{S_i} \right)^j + B \cdot \sum_{i=1}^I \max^2(Mz_i - S_i, 0) + \\ & + B \cdot \left(\sum_{i=1}^I z_i - 1 \right)^2 + B \cdot \max^2(-z_i, 0) \rightarrow \min_{z \in R^I} \end{aligned}$$

Аналіз отриманих результатів

№	План	Фактичне розподілення об.лomu	Розподілення об.лomu за отриманою моделлю	Час		
				фактичний	обчислений за отриманою функціональною залежністю за фактичним розподіленням	за моделлю
1	R7 КП	106,6	0,4	516	516	555
2	32Г2	12,44	77,03	695	695	592
3	Д 12"	12,08	16,46	585	585	582
4	09Г2С	13,88	51,25	605	604	574
	всього	145		2401	2399	2303

Аналіз отриманих результатів

№	План	Фактичне розподілення об.лomu	Розподілення об.лomu за моделлю	Час		
				фактичний	обчислений за отриманою функціональною залежністю за фактичним розподіленням	за моделлю
1	R8 КП	76,400	19,75	530	528	555
2	32Г2 12"	0,000	85,87	695	694	533
3	32Г2 11"	73,200	172,18	595	595	533
4	ст 45 9"	52,610	15,55	590	588	608
5	GrB 12"	58,46	26,91	579	578	586
6	Дбур FeV	59,49	0	559	558	602
	всього	320		3548	3540	3418

Висновки

У результаті роботи:

- Відновлена за статистичними даними функціональна залежність тривалості плавки сталі від кількості оборотного лому в шихті;
- побудовано математичну модель задачі оптимального розподілу оборотного лому;
- Реалізовано модель в EXCEL
- Проаналізовано отримані результати обчислювальних експериментів.

Результати дослідження можуть бути застосовані на металургійних підприємствах для прийняття обґрунтованого рішення про використання оборотного лому у процесі виплавки сталі