

Таблица 3 – Распределение золота по классам крупности в кеках

№ пробы	Классы кека, мм	Вес, г	Выход, %	Содержание Au, г/т	Распределение Au, %
1	- 10,0 + 5,0	2438	29,31	1,53	37,02
	- 5,0 + 1,0	3351	40,28	0,93	30,93
	- 1,0 + 0,063	2122	25,51	1,33	28,01
	- 0,063	408	4,90	1,0	4,04
2	- 20,0 + 10,0	9060	69,27	2,0	71,31
	- 10,0 + 5,0	2865	21,90	1,8	20,29
	- 5,0 + 1,0	880	6,73	1,8	6,24
	- 1,0	275	2,10	2,0	2,16
3	- 20,0 + 10,0	8010	67,53	2,1	69,74
	- 10,0 + 5,0	2371	23,17	2,0	21,15
	- 5,0 + 0	2144	9,3	2,4	9,11

Таблица 4 – Результаты перколяционного выщелачивания первичной руды

№ пробы	Исходная руда			Кек цианирования			Извл. Au в раствор, %	Расход NaCN, кг/т	Расход NaOH, кг/т
	вес, кг	содер. Au, г/т	m _{Au} , мг	вес, кг	содер. Au, г/т	m _{Au} , мг			
1	125	2,48	310,0	125	1,21	151,25	51,21	0,78	0,35
2	112	2,90	324,8	112	1,94	217,3	33,1	0,75	0,33
3	150	3,90	585	150	2,13	319,5	45,4	0,71	0,32

Таким образом, кучное выщелачивание первичных руд с низким содержанием золота рекомендуется проводить в многосекционных штабелях высотой не более 10 м, сложенных из материала, крупность которого не должна превышать – 10 мм, что позволяет извлекать до 51 % целевого металла. В массиве кучи необходимо формировать два и более слоев мелкозернистой руды крупностью –2,0 и +0,5 мм, высотой 50-120 мм, которые обеспечивают распределение гидродинамического потока по всему сечению штабеля. Цианирование золота в штабелях необходимо осуше-

ствлять с паузой в орошении 1 сутки [5]:

- на 1 этапе до достижения 20 % извлечения золота концентрацию NaCN в растворе поддерживать до 0,6 г/дм³ при плотности орошения 25 дм³/т руды;
- на 2 этапе до достижения 40 % извлечения золота – концентрацию NaCN 0,4 г/дм³ при плотности орошения 15 дм³/т руды;
- на 3 этапе, чтобы достичь более 40 % извлечение золота, – концентрацию NaCN 0,2 мг/дм³, плотность орошения 15 дм³/т руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аренс В.Ж. Физико-химическая геотехнология: Монография. М.: Изд-во МГТУ, 2001. 656 с.
2. Погапов А.А. Фракталы в радиифизике и радиолокации. Топология выборки. М.: Университетская книга, 2005. 848 с.
3. Воробьев А.Е., Каргинов К.Г., Козырев Е.Н., Алпихмин А.А. Физико-химическая геотехнология золота. Владикавказ: Ремарко, 2001. 568 с.
4. Рогов Е.И., Языков В.Г., Рогов А.Е. Математическое моделирование в горном деле. Алматы: Lem, 2004. С. 242
5. Турсунбаева А.К. Кучное выщелачивание золота в штабелях // Тр. ун-та / КарГТУ. Караганда. 2010. № 1. С. 21-23.

УДК 621.771.23.68

**НАЙЗАБЕКОВ А.Б.,
ТАЛМАЗАН В.А.,
АХМЕТЖАЛИНА Н.В.**

Регрессионные модели нагрева слябов

Математическое моделирование процессов нагрева слябов в методических толкательных печах, по-прежнему широко эксплуатируемых в листопркатных цехах металлургических заводов, – эффективный путь оптимизации режимов работы печей по различным критериям.

Цель настоящей работы – получение математической модели процесса нагрева слябов в методической толкательной печи в виде уравнений регрессии, связывающих температуру в характерных сечениях слябов с температурой в зонах печи и временем нагрева.

Модель разрабатывали применительно к нагреву литых слябов толщиной 220 мм из низкоуглеродистых марок стали в методических толкательных печах

НШПС-1700 ЛПЦ-1 АО «АрселорМиттал Темиртау». Использовали метод планируемого эксперимента и численный метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе Deform 3D, разработанном компанией Scientific Forming Technology Corporation (SFTC, США).

Рабочий профиль печи показан на рис. 1. Печь – четырёхзонная с методической, двумя сварочными и томильной зонами.

Печи отапливаются смесью коксового и доменного газов. В методической и сварочных зонах нагреваемые слябы проталкиваются по шести водоохлаждаемым теплоизолированным продольным трубам диаметром 168 мм. Во второй сварочной зоне подовые

трубы снабжены рейтерами из жаропрочной высокохромистой стали высотой 170 мм. Под в томильной зоне выполнен сплошным. В печи нагревают литые слябы толщиной 180÷220 мм, шириной 800÷1530 мм из кипящих, полуспокойных, спокойных и легированных марок стали. Средняя температура нагрева составляет 1220 °С.

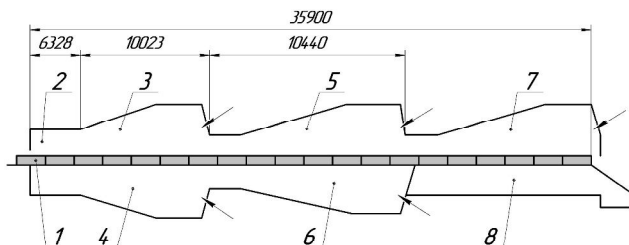


Рисунок 1 – Профиль методической печи НШПС-1700:

- 1 – нагреваемый металл; 2 – методическая зона;
 3 – первая верхняя сварочная зона; 4 – первая нижняя сварочная зона; 5 – вторая верхняя сварочная зона;
 6 – вторая нижняя сварочная зона; 7 – томильная зона;
 8 – под печи

Основными факторами, влияющими на формирование температурного поля сляба в процессе нагрева, являются температура печи и время нагрева. Поэтому за независимые переменные приняли:

$X_1 = t_1$ – температуру в методической зоне, °С;

$X_2 = t_2$ – температуру в первой верхней сварочной зоне, °С;

$X_3 = t_3$ – температуру в первой нижней сварочной зоне, °С;

$X_4 = t_4$ – температуру во второй верхней сварочной зоне, °С;

$X_5 = t_5$ – температуру во второй нижней сварочной зоне, °С;

$X_6 = t_6$ – температуру в томильной зоне, °С;

$X_7 = \tau$ – общую продолжительность нагрева слябов, мин.

В качестве функций отклика использовали:

$Y_1 = t_{m,cp}$ – среднюю температуру сляба в сечении над подовой трубой, °С;

$Y_2 = \Delta t_1 = t_{m,в} - t_{m,н}$ – градиент температур между верхней и нижней гранями сляба в сечении над подовыми трубами, °С;

$Y_3 = t_{cp}$ – среднюю температуру сляба в сечении между подовыми трубами, °С;

$Y_4 = \Delta t_2 = t_в - t_н$ – градиент температур между верхней и нижней гранями сляба в сечении между подовыми трубами, °С.

Ориентируясь на построение зависимостей вида:

$$Y = B_0 + \sum_j^k B_j X_j + \sum_{j,l}^k B_{jl} X_j X_l,$$

выбрали план дробного факторного эксперимента типа 2^{7-3} [1].

Условия планирования эксперимента (табл. 1) определили на основе режимов работы печи, регламентированных цеховой технологической инструкцией, а также экспериментальных данных по температуре в зонах печи.

Матрица планирования эксперимента приведена в таблице 2.

Таблица 1 – Условия планирования эксперимента

Параметр	Фактор						
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Основной уровень	0 1000	0 1210	0 1100	0 1315	0 1210	0 1265	0 231
Интервал варьирования	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{35}$	$\frac{1}{60}$	$\frac{1}{15}$	$\frac{1}{20}$
Нижний уровень	-1 950	-1 1150	-1 1050	-1 1280	-1 1150	-1 1250	-1 211
Верхний уровень	+1 1050	+1 1270	+1 1150	+1 1350	+1 1270	+1 1280	+1 251

Таблица 2 – Матрица плана ДФЭ 2^{7-3}

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	+	-	+	-
3	+	+	-	+	+	-	-	+
4	+	-	-	+	+	+	-	-
5	+	+	+	-	+	-	-	-
6	+	-	+	-	+	+	-	+
7	+	+	-	-	+	+	+	-
8	+	-	-	-	+	-	+	+
9	+	+	+	+	-	-	-	-
10	+	-	+	+	-	+	-	+
11	+	+	-	+	-	+	+	-
12	+	-	-	+	-	-	+	+
13	+	+	+	-	-	+	+	+
14	+	-	+	-	-	-	+	-
15	+	+	-	-	-	-	-	+
16	+	-	-	-	-	+	-	-

Примечание: в числителе – значения факторов в кодированном виде; в знаменателе – в натуральном.

В процессе моделирования в программе Deform создавали трехмерную геометрическую и конечно-

элементную модели сляба, трубы и рейтера, задавали граничные условия теплообмена. С целью сокращения машинного времени расчета и с учетом симметрии ограничились участком сляба с размерами, указанными на рисунке 2. Считали, что теплообмен происходит на верхней и нижней гранях сляба.

Полагали, что для каждой зоны печи характерен линейный температурный профиль, температура по высоте и ширине зон не изменяется, величина тепловых потоков на поверхность сляба определяется изменением температуры печи в каждой зоне и временем нагрева с учётом равномерного темпа выдачи слябов из печи. Учитывали теплообмен конвекцией.

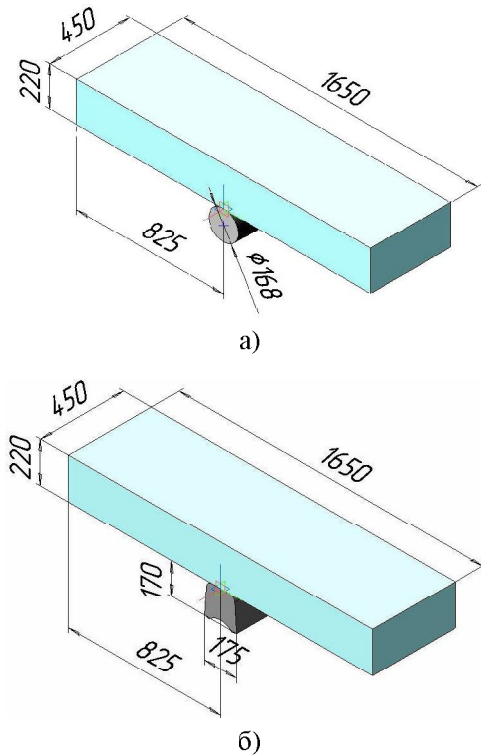


Рисунок 2 – Геометрические модели: а – расчетная геометрическая модель сляба на подовых трубах; б – расчетная геометрическая модель сляба на рейтерах

Начальную температуру металла принимали 20 °С (холодный посад) [2]. Материал слябов – сталь AISI 1015 (содержание углерода 0,15 %, марганца менее 1 %) – выбран из базы данных программы Deform.

Теплофизические характеристики: модуль Юнга $E = 210$ ГПа; число Пуассона $\nu = 0,3$; коэффициент линейного расширения $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; коэффициенты теплопроводности и теплоемкости заданы как функции от температуры; степень черноты металла $\epsilon_m = 0,7$.

Предварительно оценили достоверность результатов моделирования нагрева слябов в программе Deform, сравнивая расчётные данные с данным измерений температуры печи зонными термомпарами и температуры поверхности слябов оптическим пирометром, при нагреве слябов толщиной 180 мм из низкоуглеродистых марок стали. Измерения температуры поверхности слябов производили в начале и конце

каждой зоны. Максимальное отклонение расчётной температуры сляба от экспериментальной составило $\pm 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, что вполне приемлемо [3].

Полученные в результате численного эксперимента значения функций отклика приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты численного эксперимента, °С

№ опыта	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	1226	69	1234	63
2	1199	90	1209	82
3	1191	68	1199	62
4	1185	72	1197	64
5	1180	76	1191	69
6	1202	60	1210	54
7	1198	91	1210	82
8	1199	90	1207	84
9	1180	76	1190	69
10	1201	61	1209	55
11	1199	90	1210	81
12	1198	90	1206	84
13	1215	78	1223	72
14	1182	102	1193	94
15	1178	77	1187	71
16	1167	85	1180	76

После расчёта коэффициентов получили следующие уравнения в кодированных переменных:

$$Y_1 = 1193,75 + 2,125X_1 + 4,375X_2 + 3,625X_3 + 3,75X_4 + 5,375X_5 + 8,25X_6 + 7,5X_7; \quad (1)$$

$$Y_2 = 79,688 - 1,563X_1 - 3,188X_2 - 2,688X_3 - 2,688X_4 - 3,938X_5 + 7,813X_6 - 5,563X_7; \quad (2)$$

$$Y_3 = 1203,438 + 2,063X_1 + 3,938X_2 + 3,313X_3 + 3,688X_4 + 8,063X_5 + 8,25X_6 + 5,938X_7; \quad (3)$$

$$Y_4 = 72,625 - 1,5X_1 - 2,875X_2 - 2,625X_3 - 2,625X_4 - 4,250X_5 + 7,625X_6 - 4,5X_7. \quad (4)$$

Статистический анализ уравнений выполнен с использованием программы Microsoft Excel [4]. При уровне значимости $\alpha = 0,95$ по критерию t -Стьюдента подтверждена статистическая значимость всех коэффициентов регрессии, а по критерию F -Фишера – адекватность уравнений.

Расчитаны коэффициенты множественной корреляции R и детерминации R^2 . Их значения находятся в диапазоне $0,991 \div 0,998$, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации экспериментальных данных уравнениями регрессии.

Уравнение (1) показывает, что на $Y_1 = t_{cp}$ – среднюю температуру в сечении – над подовыми трубами в ослабевающем порядке оказывают влияние факторы: $X_6 = t_6$ – температура в томильной зоне; $X_7 = \tau$ – продолжительность нагрева слябов; $X_5 = t_5$ – температура во второй нижней сварочной зоне; $X_2 = t_2$ – температура в первой верхней сварочной зоне; $X_3 = t_3$ – температура в первой нижней сварочной зоне; $X_4 = t_4$ – температура во второй верхней сварочной зоне; $X_1 = t_1$ – температура в методической зоне. При этом для увеличения средней температуры в сечении сляба

над подовой трубой необходимо увеличивать все вышеперечисленные факторы.

Из уравнений (2) и (4) следует, что по ослабевающему влиянию на $Y_2 = \Delta t_1$ и $Y_4 = \Delta t_2$ – градиенты температур в сечениях сляба над подовыми трубами и между ними соответственно – факторы можно разместить в следующий ряд: $X_6 = t_6$, $X_7 = \tau$, $X_5 = t_5$, $X_2 = t_2$, $X_3 = t_3$, $X_4 = t_4$, $X_1 = t_1$ (отметим, что факторы $X_3 = t_3$ и $X_4 = t_4$ в одинаковой мере влияют на градиенты $Y_2 = \Delta t_1$ и $Y_4 = \Delta t_2$). При этом для уменьшения градиентов температур $Y_2 = \Delta t_1$ и $Y_4 = \Delta t_2$ необходимо уменьшать $X_6 = t_6$ – температуру в томильной зоне и увеличивать все остальные факторы.

Из уравнения (3) следует, что по ослабевающему влиянию на $Y_3 = t_{cp}$ – температуру в сечении между подовыми трубами – факторы можно разместить в следующий ряд: $X_6 = t_6$, $X_5 = t_5$, $X_7 = \tau$, $X_2 = t_2$, $X_3 = t_3$, $X_4 = t_4$, $X_1 = t_1$. Для увеличения средней температуры в сечении сляба между подовыми трубами необходимо увеличивать все вышеперечисленные факторы.

После перехода от кодированных к натуральным переменным уравнения (1)÷(4) преобразовали к виду:

$$Y_1 = -48,393 + 0,0425t_1 + 0,0729t_2 + 0,0725t_3 + 0,1072t_4 + 0,0896t_5 + 0,55t_6 + 0,375\tau; \quad (5)$$

$$Y_2 = -179,884 - 0,03125t_1 - 0,053t_2 - 0,0537t_3 - 0,07679t_4 - 0,0656t_5 + 0,521t_6 - 0,278\tau; \quad (6)$$

$$Y_3 = 8,148 + 0,0413t_1 + 0,0656t_2 + 0,0663t_3 + 0,1054t_4 + 0,0948t_5 + 0,5375t_6 + 0,2969\tau; \quad (7)$$

$$Y_4 = -188,379 - 0,03t_1 - 0,0479t_2 - 0,0525t_3 - 0,075t_4 - 0,0708t_5 + 0,5083t_6 - 0,225\tau; \quad (8)$$

Таким образом, в результате реализации на ЭВМ, с использованием программы Deform 3D, численного планируемого эксперимента типа 2^{7-3} получили адекватные линейные уравнения регрессии, описывающие тепловое состояние слябов в характерных сечениях слябов. Уравнения (5)÷(8) можно использовать для прогнозирования теплового состояния слябов на выходе из методической печи при нагреве по заданному режиму и оптимизации режимов нагрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.
2. Расчет нагревательных и термических печей: Справ. изд. / Под. ред. В.М. Тымчака и В.Л. Гусовского. М.: Металлургия, 1983.
3. Найзабеков А.Б., Талмазан В.А., Ахметгалина Н.В. Моделирование нагрева слябов в методической печи различной конструкции // Технология производства металлов и вторичных материалов / Темиртауский КГИУ. 2009. № 1.
4. Решение математических задач средствами Excel: Практикум / В.Я. Гельман. СПб.: Питер, 2003.

УДН 669.213-66.094.6

**ВОРОБЬЕВ А.Е., ТУРСУНБАЕВА
А.К., ПОРТНОВ В.С.,
МАУСЫМБАЕВА А.Д., ЮРОВ
В.М.**

Влияние гранулометрического состава на процесс кучного выщелачивания золота

Кучное выщелачивание (КВ), позволившее вовлечь в отработку крупные месторождения с бедными (1-1,5 г/т) рудами, а также вскрышные породы, техногенное золотосодержащее сырье и небольшие по запасам месторождения, стало главным фактором развития золотодобычи в США, Австралии, Канаде, Мексике, Бразилии, Чили и других странах и дало им возможность за двадцать лет в 2-3 раза увеличить добычу золота. В настоящее время примерно половина мировой добычи золота приходится на технологию КВ [1].

На территории Казахстана методом КВ обрабатываются следующие месторождения: Васильковское, Пустынное, Жанан, Центральное Мукурское, Большевик, Мизек, Миялы, Суздальское, Карьерное (рудные отвалы) и готовятся к отработке месторождения окисленных руд (кор выветривания) Комаровское, Элеваторное и Центральный Карамурын. Первая установка КВ была запущена в Казахстане на Васильковском ГОКе в 1991 году.

В качестве растворителей при КВ нашли применение цианиды натрия [2]. Главными типами руд,

пригодных для цианидного КВ, являются [1]: окисленные вкрапленные руды; сульфидные руды, в которых благородные металлы не являются тесно ассоциированными с сульфидными минералами; руды коренных месторождений и россыпи, содержащие тонкое золото или частицы с высоким отношением площади поверхности к весу.

Ниже приводятся детальныe характеристики свойств благородных металлов и руд с точки зрения их пригодности для КВ цианидными растворами [2]: нахождение золота в форме очень тонких или уплощенных частиц; высокая пористость и проницаемость пород, заключающих оруденение; отсутствие в руде углистого материала и других сорбентов, вызывающих преждевременную адсорбцию либо осаждение золота из раствора; низкое содержание в руде цианидов, металлоцианидных комплексов, оттягивающих на себя цианиды и нарушающих ход реакции растворения; низкое содержание в руде глинистого компонента и других тонких фракций, препятствующих равномерной циркуляции выщелачивающего раствора; отсутствие в руде кислотообразующих ингреди-