

## Определение оптимальных условий флотации молибдена с применением вероятностно-детерминированного метода планирования эксперимента

Исследование процессов флотации молибденовых руд Саякского месторождения проведено с использованием вероятностно-детерминированного метода планирования (ВДП) экспериментов, основанного на известной формуле М.М. Протодьяконова для обработки статистических данных [1] и усовершенствованного проф. В.П. Малышевым [2]. Применение ВДП позволяет исследовать процесс флотации молибденовых руд при различных сочетаниях влияющих факторов с определением оптимального режима процесса.

Поскольку конечной целью флотации является получение сульфидов металлов, обладающих флотационными свойствами, достаточными для получения кондиционных концентратов, контроль за влиянием вышеуказанных параметров осуществляли по качественно-количественным характеристикам флотации, т.е. по содержанию ( $\beta$ ) молибдена в концентрате и ( $\varepsilon$ ) извлечению молибдена в концентрат и хвосты. План-матрица и результаты экспериментов по флотации

каждого из 25-ти опытов представлены в таблице 1.

Для определения оптимальных условий процесса флотации молибденовой руды с применением реагента-собиравателя ВК-987 составлен план шестифакторного эксперимента на пяти уровнях. За независимые факторы приняты измельчение молибденовой руды (содержание класса  $-0,074$  мм, %); расходы флотационного реагента ВК-987, г/т; вспенивателя Т-80, г/т; жидкого стекла, г/т; рН среды. Пределы изменения независимых факторов представлены в таблице 2.

После выборки экспериментального массива по факторам были построены точечные графики частных зависимостей извлечения молибдена в концентрат от условий проведенного процесса (рисунок 1 а-д), которые аппроксимировали уравнениями (таблица 3).

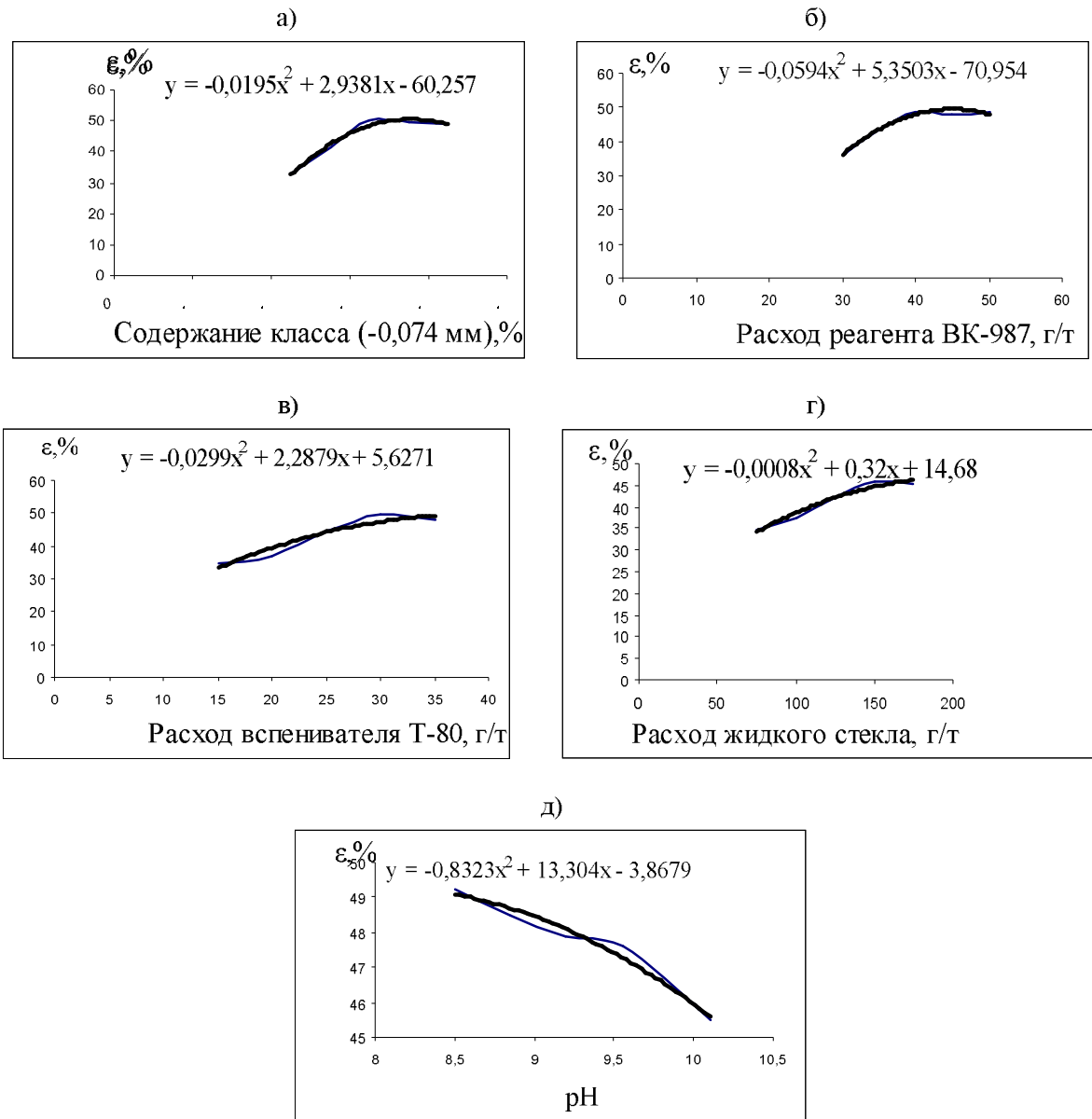
Из приведенных данных следует, что в условиях эксперимента определяющими факторами процесса являются: содержание класса  $-0,074$  мм; расходы ВК-987, Т-80, жидкое стекло, рН среды.

Таблица 1 – План-матрица и результаты шестифакторного эксперимента по флотации молибденовой руды

№	Факторы					Извлечение Мо в концентрат, $\varepsilon$ , %		Извлечение Мо в хвосты, $\varepsilon$ , %		Содержание Мо в концентрате, $\beta$ , %	
	Содер. класса $-0,074$ мм, %	ВК-987, г/т	Т-80, г/т	Жидк. стекло, г/т	рН	$\varepsilon_{\text{экспер}}$	$\varepsilon_{\text{теор}}$	$\varepsilon_{\text{экспер}}$	$\varepsilon_{\text{теор}}$	$\beta_{\text{экспер}}$	$\beta_{\text{теор}}$
1	45	30	15	75	8,5	18,03	17,02	98,68	116,15	3,84	4,08
2	45	40	25	125	9,2	37,50	36,37	69,14	70,79	6,63	6,86
3	45	35	20	100	8,85	24,88	27,35	92,75	87,39	6,22	5,62
4	45	50	35	175	10,1	42,44	40,55	62,40	62,89	6,21	6,55
5	45	45	30	150	9,55	43,01	43,44	61,88	62,94	6,46	6,79
6	65	30	25	100	10,1	35,33	35,39	73,12	73,99	6,25	6,56
7	65	40	20	175	9,55	50,53	52,06	55,70	55,52	9,10	8,86
8	65	35	35	150	8,5	61,61	59,02	48,47	50,32	9,45	8,72
9	65	50	30	75	9,2	52,03	47,11	53,24	58,06	9,95	9,46
10	65	45	15	125	8,85	44,35	42,55	60,75	62,14	8,28	8,19
11	55	30	20	150	9,2	31,21	33,74	80,67	77,08	5,33	5,60
12	55	40	35	75	8,85	42,67	43,28	63,01	61,98	8,25	8,49
13	55	35	30	125	10,1	45,12	43,77	62,78	64,82	7,44	7,51
14	55	50	15	100	9,55	32,23	32,22	77,80	77,74	6,29	6,65
15	55	45	25	175	8,5	52,18	54,68	55,73	53,57	8,15	9,08
16	85	30	35	125	9,55	44,21	44,73	61,87	61,33	6,34	6,81
17	85	40	30	100	8,5	56,67	54,66	50,51	52,82	10,46	10,59
18	85	35	15	175	9,2	42,14	40,67	63,99	65,13	7,49	7,32
19	85	50	25	150	8,85	66,72	58,43	48,84	50,92	9,83	9,90
20	85	45	20	75	10,1	35,81	38,54	71,40	67,68	8,76	9,35
21	75	30	30	175	8,85	50,45	50,48	58,49	55,41	6,67	7,34
22	75	40	15	150	10,1	45,07	42,69	56,27	62,30	7,21	8,03
23	75	35	25	75	9,55	41,68	40,80	64,69	65,27	8,34	8,91
24	75	50	20	125	8,5	47,77	51,53	58,07	55,23	9,23	9,50
25	75	45	35	100	9,2	53,36	59,38	53,46	48,80	9,01	10,16

Таблица 2 – Факторы и уровни их варьирования при исследовании процесса флотации молибденовых руд с применением флотореагента ВК 987

Фактор	Уровень				
	1	2	3	4	5
Содержание класса (-0,074 мм, %)	45	55	65	75	85
ВК-987, г/т	30	35	40	45	50
Т-80, г/т	15	20	25	30	35
Жидкое стекло, г/т	75	100	125	150	175
pH	8,5	8,85	9,2	9,55	10,1



а) от содержания класса -0,074 мм, %; б) расхода ВК-987, г/т; в) расхода Т-80, г/т; г) расхода жидкого стекла, г/т; д) pH

Рисунок 1 – Частные зависимости извлечения молибдена в концентрат

Таблица 3 – Уравнения частных зависимостей извлечения молибдена в концентрат от исследуемых факторов

Уравнение	R	Коэффициент корреляции R и его значимость по $t_R > 2$
		Значимость, $t_R$
$\epsilon_{\text{измел}} = -0,0195x_{\text{измел}}^2 + 2,9381x_{\text{измел}} - 60,257$	0,98	37,34 > 2
$\epsilon_{\text{вк-987}} = -0,0594x_{\text{вк-987}}^2 + 5,3503x_{\text{вк-987}} - 70,954$	0,98	36,03 > 2
$\epsilon_{\text{т-80}} = -0,0299x_{\text{т-80}}^2 + 2,2879x_{\text{т-80}} + 5,6271$	0,95	9,203 > 2
$\epsilon_{\text{ж.стекло}} = -0,0008x_{\text{ж.стекло}}^2 + 0,32x_{\text{ж.стекло}} + 14,68$	0,98	29,38 > 2
$\epsilon_{\text{рН}} = -0,8323x_{\text{рН}}^2 + 13,304x_{\text{рН}} - 3,8679$	0,99	233,00 > 2

Так, извлечение молибдена в концентрат возрастает с 37,2 до 49,9% при содержании класса (-0,074 мм) от 45 до 65% в процессе измельчения (рисунок 1 а). Дальнейшее повышение степени измельчения до 75 и 85% дает незначительный прирост извлечения молибдена. Поэтому наиболее оптимальным режимом измельчения следует считать 65% при содержании класса -0,074 мм.

Из параболического графика частной зависимости (рисунок 1 б) при изучении влияния расхода реагента-собиравателя ВК-987 г/т на извлечение молибдена в концентрат следует, что наиболее оптимальным является расход 40 г/т. Дальнейшее увеличение расхода реагента на показатели извлечения молибдена в концентрат практически не влияет.

При варьировании расхода вспенивателя Т-80 в интервале от 15 до 35 г/т (рисунок 1 в) максимальные показатели по извлечению молибдена в концентрат обеспечиваются при расходе вспенивателя 30 г/т. При дальнейшем увеличении расхода Т-80 до 35 г/т извлечение молибдена в концентрат уменьшается до 48%.

Из рисунка 1 г следует, что с увеличением расхода жидкого стекла от 75 до 150 г/т при флотации молибденовой руды происходит увеличение извлечения молибдена в концентрат до 45,8%. При увеличении расхода жидкого стекла до 175 г/т извлечение молибдена в концентрат практически остается на том же уровне, т.е. оптимальным является расход 150 г/т.

Экспериментами показано, что изменение pH влияет на показатели извлечения молибдена в концентрат (рисунок 1 д). При увеличении pH от 8,5 до 10,1 наиболее максимальные показатели по извлечению молибдена в концентрат 49,22% наблюдаются при pH=8,5.

Расчетные данные извлечения молибдена в концентрат сведены в таблицу 1.

Обобщенное многофакторное уравнение нелинейной множественной корреляции, составленной на основании частных функций, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{концентрат}} = & \frac{(-0,0195x_{\text{измел}}^2 + 2,9381x_{\text{измел}} - 60,257)}{44,26^4} * \\ & * \frac{(-0,0594x_{\text{BK}}^2 + 5,3503x_{\text{BK}} - 70,954)}{3} * \\ & * \frac{(-0,0299x_{\text{T-80}}^2 + 2,2879x_{\text{T-80}} + 5,6271)}{3} * \\ & * \frac{(-0,0008x_{\text{ж.стекло}}^2 + 0,32x_{\text{ж.стекло}} + 14,68)}{3} * \\ & * \frac{(-0,8323x_{\text{pH}}^2 + 13,304x_{\text{pH}} - 3,8679)}{3}; \end{aligned}$$

$$R_1 = 0,99; t_{R_1} = 233,00.$$

Используя полученное уравнение многофакторной корреляционной зависимости, моделировали процесс извлечения молибдена при флотации молибденовой руды, задаваясь влияющими факторами, измельчением 65%, расходами реагентов: ВК-987 – 40 г/т, Т-80 – 30 г/т, жидкое стекло – 150 г/т, pH=8,5. При этом извлечение молибдена в концентрат составило 62,80 %.

При рассмотрении технологической схемы необходимо в оптимальных условиях учесть содержание молибдена в концентрате.

Графики частных зависимостей содержания молибдена в концентрате от параметров процесса флотации представлены на рисунке 2 а-д.

В результате математических преобразований получены аппроксимирующие уравнения, представленные в таблице 4.

Из графика частной зависимости следует, что при увеличении измельчения класса (-0,074 мм) от 45 до 65% содержание молибдена в концентрате возрастает от 5,6 до 8,2% (рисунок 2 а). Дальнейшее увеличение измельчения не дает значительного прироста содержания молибдена в концентрате. Поэтому оптимальным режимом измельчения следует считать 65% класса -0,074 мм при флотации молибденовой руды.

При изучении расхода реагента-собиравателя ВК-987 г/т на качество молибдена в концентрате (рисунок 2 б) следует, что наиболее оптимальным является расход реагента 40 г/т. При этом содержание молибдена в концентрате составляет 8,14%. Дальнейшее увеличение расхода реагента ВК-987 от 45 до 50 г/т на показатели содержания молибдена влияет незначительно.

Из параболического графика частной зависимости содержания молибдена в концентрате от расхода вспенивателя Т-80 (рисунок 2 в) показало, что максимальные показатели по качеству молибдена в концентрате обеспечиваются при расходе вспенивателя 30 г/т. При увеличении расхода Т-80 до 35 г/т показатели по качеству концентрата изменяются незначительно.

Частные уравнения от влияния добавок жидкого стекла оказались незначимыми (рисунок 2 г). Это, возможно, обусловлено в первую очередь с широким интервалом расхода жидкого стекла. Однако дополнительно проведенными экспериментами установлено, что при расходе 150 г/т жидкого стекла показатели по содержанию молибдена в концентрате увеличиваются на 5%.

Экспериментами показано, что изменение pH влияет на показатели качества молибдена в концентрате при флотации молибденовой руды (рисунок 2 д). При увеличении pH в интервале от 8,5 до 10,1 наиболее максимальные показатели по содержанию молибдена в концентрате 8,2% наблюдаются при pH=8,5.

Обобщенное уравнение нелинейной множественной корреляции для расчета содержания молибдена в концентрате флотации от значимых факторов имеет вид:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{концентрат}} = & \frac{(-0,00242x_{\text{измел}}^2 + 0,3777x_{\text{измел}} - 6,485)}{7,53^3} * \\ & * \frac{(-0,0134x_{\text{BK-987}}^2 + 1,1803x_{\text{BK-987}} - 17,634)}{3} * \\ & * \frac{(-0,00083x_{\text{T-80}}^2 + 0,4803x_{\text{T-80}} + 1,2257)}{3} * \\ & * \frac{(0,1092x_{\text{pH}}^2 - 2,3599x_{\text{pH}} + 20,387)}{3}; \end{aligned}$$

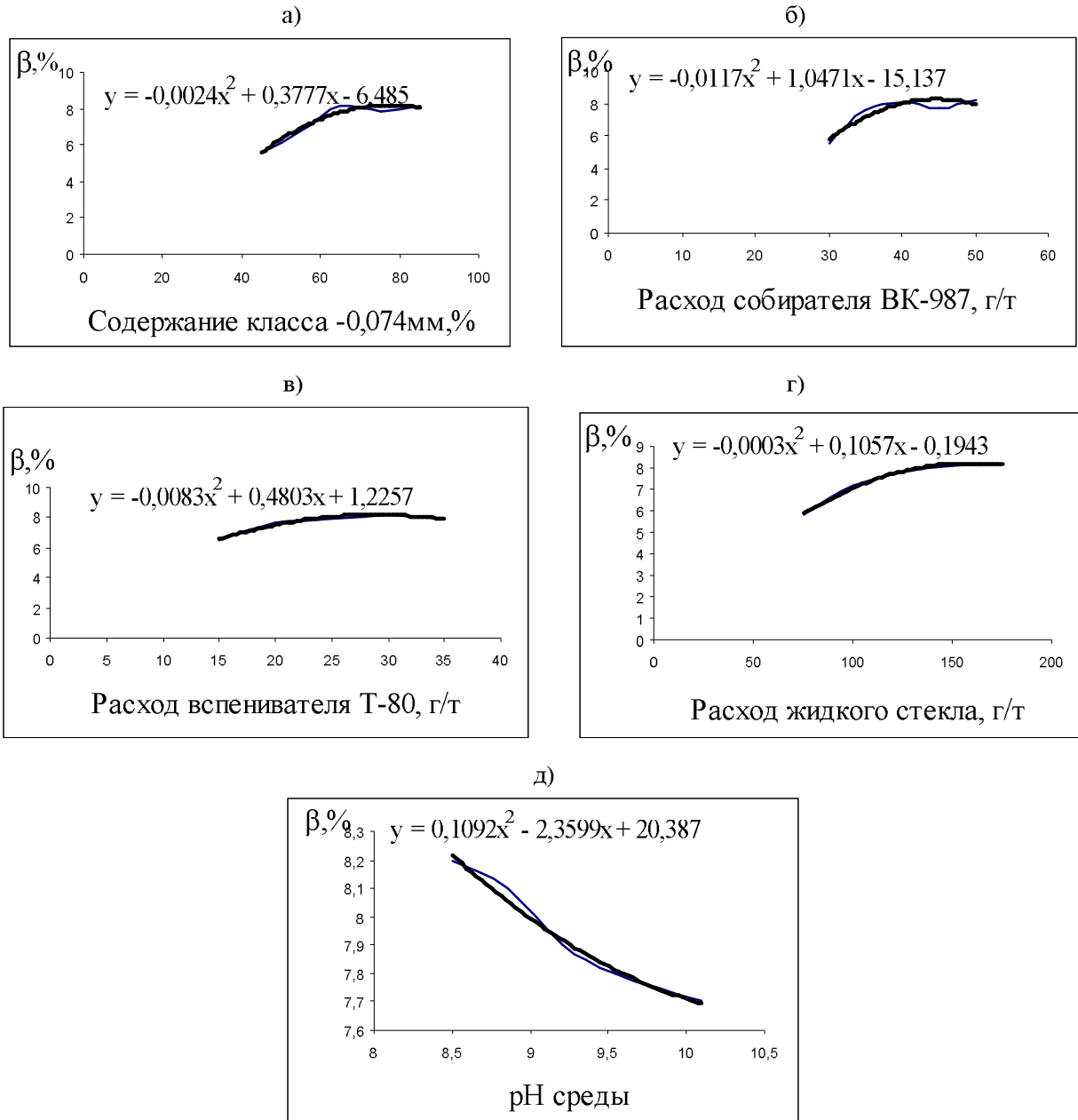
$$R_1 = 0,94; t_{R_1} = 39,10.$$

Расчетные данные содержания молибдена в концентрате сведены в таблице 1.

Согласно описанной математической модели содержание молибдена в концентрате составляет 10,1% при измельчении класса -0,074 мм 65%, расходе реагента-собирателя ВК-987 – 40 г/т, Т-80-30 г/т, рН=8,5. По экспериментальным данным при доработке режи-

ма флотации следует ожидать его понижение.

Аналогично с учетом выхода продуктов извлечения молибдена в хвосты флотации от исследуемых факторов описываются точечными графиками частных зависимостей (рисунок 3 а-д), которые аппроксимируются следующими уравнениями (таблица 5).

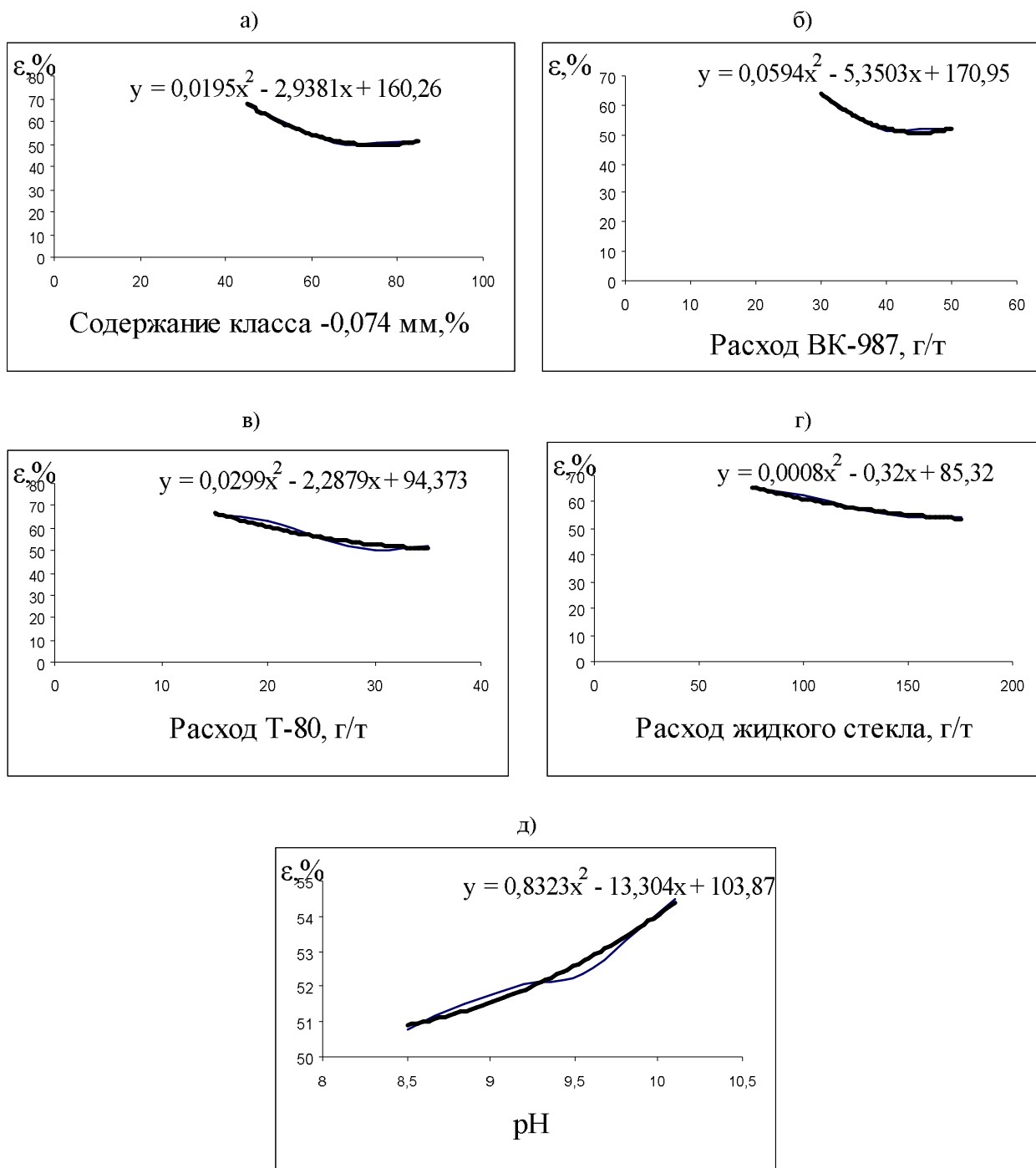


а) от содержания класса -0,074 мм, %; б) расхода ВК-987, г/т; в) расхода Т-80, г/т; г) расхода жидкого стекла, г/т; д) рН среды

Рисунок 2 – Частные зависимости содержания молибдена в концентрате

Таблица 4 – Уравнения частных зависимостей содержания молибдена в концентрате от исследуемых факторов

Уравнение	Коэффициент корреляции $R$ и его значимость по $t_R > 2$	
	$R$	Значимость, $t_R$
$\beta_{\text{измел}} = -0,0024x_{\text{измел}}^2 + 0,3777x_{\text{измел}} - 6,485$	0,94	8,59 > 2
$\beta_{\text{ВК-987}} = -0,0134x_{\text{ВК-987}}^2 + 1,1803x_{\text{ВК-987}} - 17,634$	0,95	9,13 > 2
$\beta_{\text{Т-80}} = -0,0083x_{\text{Т-80}}^2 + 0,4803x_{\text{Т-80}} + 1,2257$	0,98	21,12 > 2
$\beta_{\text{ж.стекло}} = -0,0003x_{\text{ж.стекло}}^2 + 0,1057x_{\text{ж.стекло}} - 0,1943$	0,61	0,96 < 2 незначима
$\beta_{\text{рН}} = 0,1092x_{\text{рН}}^2 - 2,3599x_{\text{рН}} + 20,387$	0,94	7,75 > 2



а) от содержания класса  $-0,074$  мм, %; б) расхода ВК-987, г/т;  
в) расхода Т-80, г/т; г) расхода жидкого стекла, г/т; д) рН  
Рисунок 3 – Частные зависимости извлечения молибдена в хвосты

Таблица 5 – Уравнения частных зависимостей извлечения молибдена в хвосты флотации от исследуемых факторов

Уравнение	Коэффициент корреляции $R$ и его значимость по $t_R > 2$	
	$R$	Значимость, $t_R$
$\epsilon_{\text{измел}} = 0,0195x_{\text{измел}}^2 - 2,9381x_{\text{измел}} + 160,26$	0,99	40,05 > 2
$\epsilon_{\text{ВК-987}} = 0,0594x_{\text{ВК-987}}^2 - 5,3503x_{\text{ВК-987}} + 170,95$	0,99	37,67 > 2
$\epsilon_{\text{Т-80}} = 0,0299x_{\text{Т-80}}^2 - 2,2879x_{\text{Т-80}} + 94,373$	0,96	11,99 > 2
$\epsilon_{\text{ж.стекло}} = 0,0008x_{\text{ж.стекло}}^2 - 0,32x_{\text{ж.стекло-80}} + 85,32$	0,99	46,67 > 2
$\epsilon_{\text{рН}} = 0,8323x_{\text{рН}}^2 - 13,304x_{\text{рН}} + 103,87$	0,99	61,76 > 2

Математические модели процесса в виде обобщенных многофакторных уравнений, составленные на основе полученных частных зависимостей, имеют вид: для извлечения молибдена в хвосты флотации

$$\varepsilon_{\text{хвосты}} = \frac{(0,0195x_{\text{измел}}^2 - 2,9381x_{\text{измел}} + 160,26)}{53,7^4} * \\ * \frac{(0,0594x_{\text{BK-987}}^2 - 5,3503x_{\text{BK-987}} + 170,95)}{*} * \\ * \frac{(0,0299x_{\text{T-80}}^2 - 2,2879x_{\text{T-80}} + 94,373)}{*} * \\ * \frac{(0,0008x_{\text{ж.стекло}}^2 - 0,32x_{\text{ж.стекло}} + 85,32)}{*} * \\ * \frac{(0,8323x_{\text{pH}}^2 - 13,304x_{\text{pH}} + 103,87)}{*};$$

$$R_1 = 0,96; t_{R_1} = 49,95.$$

Расчетные данные извлечения меди в хвосты флотации представлены в таблице 1.

В соответствии с полученной математической моделью в оптимальных условиях флотации извлечение молибдена в хвосты флотации составляет 50,01%.

Анализ частных зависимостей показал, что в матричных экспериментах все изучаемые факторы влияют как на процесс флотации молибденовых руд, так и на его качество.

Высокие значения  $R_1$ ,  $t_{R_1}$  для уравнения свидетельствуют об адекватности многофакторных зависимостей процессу флотации молибденовой руды Саякского месторождения.

Таким образом, результаты анализа показателей по извлечению в концентрат, хвосты и содержанию молибдена в концентрате подтвердили, что выбранная модель адекватно отображает процесс.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малышев В.И. Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. Алматы: Наука, 1977. 37 с.
2. Малышев В.И. Вероятностно-детерминированное планирование эксперимента. Алматы: Наука, 1981. 115 с.