

УДК 622.765

**РАЗРАБОТКА РЕЖИМА ФЛОТАЦИИ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД
СМЕСЬЮ ВОЗДУХА С ВОДЯНЫМ ПАРОМ**

С. И. Евдокимов, Т. Е. Герасименко

*Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет)*

E-mail: gerasimenko_74@mail.ru, ул. Николаева, 44, 362021, РСО-Алания, г. Владикавказ, Россия

Для флотации золотосодержащих руд разработана схема, при которой разубоживание питания основной флотации труднообогатимыми промпродуктами уменьшается. При этом черновой концентрат переочищают в условиях аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром. В холодной пульпе теплота конденсации пара отводится из пузырьков в смачивающие пленки. При повышении температуры силы гидрофильного отталкивания, стабилизирующие устойчивость пленок, могут быть сведены к избыточному осмотическому давлению между гидрофильными поверхностями, а потеря пленками устойчивости между гидрофобными поверхностями к избыточному осмотическому давлению окружающей воды — силам гидрофобного притяжения. Разработан стенд для измерения коэффициентов теплоотдачи при аэрации жидкости паровоздушной смесью. Выявленные закономерности процесса теплоотдачи позволили определить рациональный расход пара, обеспечивающий нагрев воды в граничных слоях пузырьков при минимальных потерях теплоносителя. На пробе руды показана возможность повышения извлечения золота за счет использования разработанных конфигураций основного цикла флотации и способа перемешивания чернового концентрата.

Золотосодержащие руды, флотация, паровоздушная смесь, повышение извлечения золота

DOI: 10.15372/FTPRI20210217

Золотодобывающая отрасль находится под влиянием устойчивой тенденции к росту стоимости золота на мировом рынке. Производство золота определяется тем, что любые объемы добываемого золота будут востребованы в финансовом секторе экономики (в качестве инвестиционных, накопительных и страховых ресурсов), промышленном и ювелирном производстве, медицине. Производственные стратегии золотодобывающих компаний, выстроенные с учетом спроса и цены на металл, направлены на увеличение добывающих мощностей.

Золотодобывающие компании наращивали объем добычи руд за счет вовлечения в эксплуатацию месторождений с легкоизвлекаемыми формами золота [1]. Эта наиболее инвестиционно-привлекательная часть фонда недр ими практически полностью освоена. К настоящему времени в нераспределенном фонде недр велика доля запасов руд с типоморфными признаками упорного золота. Разработка технологий его извлечения является актуальной задачей, решение которой увеличивает доступность месторождений с трудноизвлекаемыми формами золота.

Проблема выделения трудноизвлекаемых форм свободного (металлического) золота гравитационными методами надежно решена путем разработки техники и технологии концентрации руд в интенсивных центробежных полях. Основным методом переработки руд с золотом, вкрапленным в сульфиды, и неконтрастных по смачиваемости (с небольшой разницей в скорости флотации разделяемых минералов) остается флотация.

Для повышения эффективности разделения минералов флотацией воздействуют на все фазы флотационной пульпы: твердую (например, микроволновой обработкой [2], комплексобразующими аминами [3], физической формой сорбции собирателя [4], высокоэнергетическими электронами [5], высоковольтными наносекундными импульсами [6], разрядно-импульсной обработкой [7]), жидкую (изменением температуры пульпы [8]) и газовую (углеводородными маслами [9]).

При флотации устойчивость смачивающих пленок может быть изменена за счет их нагрева: при повышении температуры время индукции уменьшается на несколько порядков [10–12]. В условиях внезапного контакта холодной воды с пузырьком, заполненным горячим водяным паром, в зону контакта частицы с пузырьком может поступить > 2200 кДж/кг в виде теплоты конденсации пара.

Цель настоящей работы — экспериментальное доказательство и теоретическое обоснование возможности получения технологического эффекта от применения аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром — флотации термонагруженными пузырьками.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В лабораторных условиях исследовательские испытания режима флотации паровоздушной смесью проведены на пробе руды Олимпиадинского месторождения. Химический состав пробы руды позволяет отнести ее к сульфидным (первичным) рудам (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Химический состав исходной пробы руды

Элемент и соединение	Содержание, %	Элемент и соединение	Содержание, %
Cu	0.006	Fe	2.35
Pb	0.006	S	1.52
Zn	0.019	SiO ₂	48.70
As	0.360	Au	2.95±0.14 г/т
Sb	0.030	Ag	2.4 г/т

Сульфидные минералы в пробе исходной руды представлены (в порядке убывания) пирротин, пиритом, арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом и антимонитом. Породообразующими минералами пробы исходной руды являются кварц, карбонаты и слюды.

Из результатов рационального анализа на формы золота, приведенного в табл. 2, следует, что в тонкоизмельченной руде из всего золота на свободное золото приходится 15.0 %, больше половины находится в сростках и связано с сульфидами.

Оптические исследования выполнены с применением поляризационного микроскопа LeicaDM 2700P, для изучения минералогического состава использован оптический стереомикроскоп Olympus модели SZ51, для рентгеноспектрального микроанализа минералов — электронно-зондовый микроанализатор EPMA-1720/1720H. Содержание золота определяли пробирным концентрированием благородных металлов в свинцовый сплав и пробирно-атомно-абсорбционным методом.

ТАБЛИЦА 2. Результаты рационального анализа форм золота в пробе исходной руды

Продукт	Содержание золота, г/т (%)					
	свободное	в сростках	в "рубашке"	в кварце	в сульфидах	общее
Проба исходной руды, измельченная до крупности 85 % кл. – 71 мкм	0.45 (15.0)	0.98 (32.7)	0.37 (12.4)	0.34 (11.2)	0.86 (28.7)	3.0 (100.0)

Для измерения коэффициента теплоотдачи при барботировании воды паром разработан стенд (рис. 1) с ячейкой-калориметром 4 в виде рабочей зоны флотационной машины механического типа.

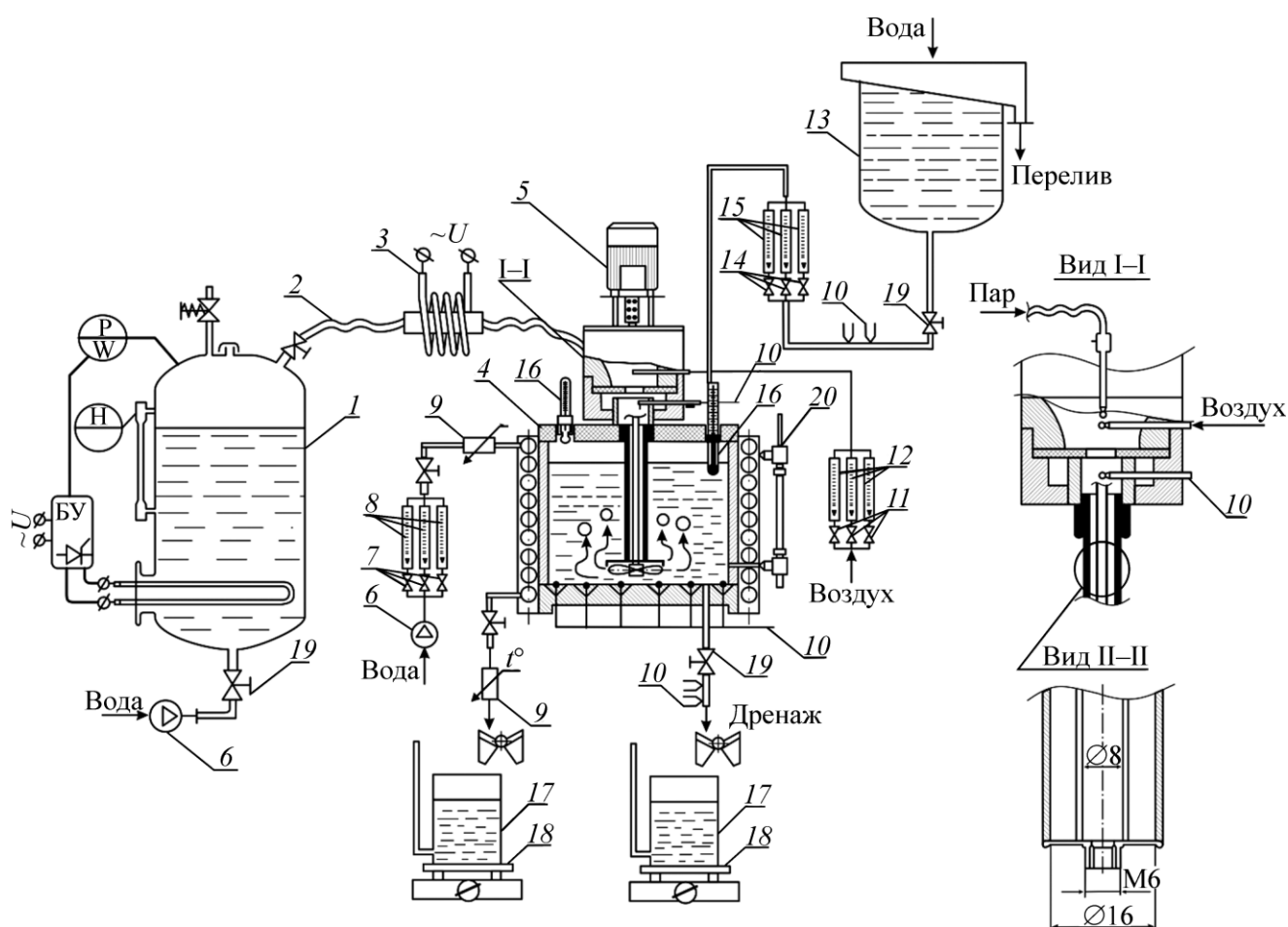


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — котел парогенератора; 2 — паропровод с электрическим пароперегревателем 3; 4 — ячейка-калориметр с приводом блока импеллера 5; 6–9 — гидросистема с водяным насосом 6, регулируемыми вентилями расхода воды 7, ротаметрами 8; 9 — термопара; 10 — термометр сопротивления; 11, 12 — пневмосистема с регулирующими вентилями расхода воздуха 11 и ротаметрами 12; 13–15 — контур подачи воды из бака постоянного напора 13 с регулирующими вентилями расхода воды 14, ротаметрами 15; 16 — система термометрии; 17 — мерная емкость; 18 — весы; 19 — вентиль; 20 — уровнемер; вид I–I — фрагмент разреза входа аэрационной трубы с камерой смешения воздуха с паром; вид II–II — фрагмент разреза насадки

Парогенератор установки выполнен в виде котла 1 с рабочим объемом 12.0 дм³ с двумя U-образными электронагревателями (ТЭНами) мощностью 315 кВт. Давление пара в котле плавно регулируется изменением мощности ТЭНов релейным способом. Электрические контакты на ТЭНах замыкаются при заполнении котла до датчика верхнего уровня воды.

Котел соединен со шлюзовой камерой ячейки-конденсатора (калориметром) паровой магистрали с пароперегревателем из нихромовой проволоки. Теплопроводом служит гибкий силиконовый шланг, экранированный от теплопотерь шнуром из асбеста. В шлюзовую камеру входит пневмопровод, сообщающийся с атмосферой через ротаметры и регулирующие вентили расхода воздуха. Шлюзовая камера предназначена для смешения пара и воздуха в заданном соотношении.

Калориметр изготовлен из стали марки 12Х18Н10Т в виде цилиндра с площадью основания 0.011 м² и высотой 0.3 м. Через герметичную верхнюю крышку калориметр в ячейку-конденсатор с сальниковыми уплотнениями из фторопласта помещен блок импеллера лабораторной флотационной машины механического типа с регулируемым числом оборотов привода 4. Вход аэрационной трубы блока импеллера сообщен со шлюзовой камерой, а выход — с узким зазором между статором и импеллером. Импеллер выполнен в виде диска \varnothing 0.068 м со ступицей с четырьмя радиальными лопатками. В зазоре из-за вращения импеллера давление понижено и сюда из шлюзовой камеры поступает паровоздушная смесь. При максимальном числе оборотов импеллера в рабочую зону поступает до 4.1 м³/(мин·м²) воздуха.

Ячейка проточная: в рабочую зону из напорного бака при постоянном давлении может поступать и удаляться в дренаж до 1.2 м³/(мин·м²) воды. При минимальных расходах воды время пребывания (задержки) потока в рабочей зоне ячейки составляет до 100 с.

На аэрационную трубу блока импеллера может накручиваться насадка (рис. 1, вид I–I) в виде коаксиально установленных трубок из стали марки 12Х18Н10Т с внутренними диаметрами 16 и 8 мм. Насадка заканчивается резьбовым сходом М6 × 0.75 для установки сопел разного диаметра. Воздушный зазор между трубками в насадке предотвращает конденсацию пара перед соплом.

Экспериментальная ячейка помещена в кольцевой трубопровод с системой подвода 6–9 и отвода 9, 17, 18 воды, по температуре которой определяют момент наступления стационарного режима работы стенда и тепловой поток на стенку ячейки.

Для измерения температуры холодного и горячего теплоносителя в состав установки входит система термометрии на основе хромель-копелевых термопар (ТХК) и ртутных погружных термометров типа СП-73 с диапазоном измерения температуры (8–38) °С и с ценой деления 0.2 °С; регистрацию напряжения на термопарах осуществляют цифровым вольтметром типа Щ 1516 и потенциометрами ЭПД-07 и ПП-63 с классом точности 0.05.

Температуру паровоздушной смеси на входе в аэрационную трубу определяли в шлюзовой камере с помощью запаянной в стальную гильзу термопары. Для измерения температуры потока воды на выходе (дренажа) из калориметра в шести сечениях через колодцы с наружным \varnothing 0.9 мм из нержавеющей стали в дно ячейки вмонтированы горячие спаи кабельных хромель-копелевых термопар \varnothing 0.2 мм. Их холодные спаи термостатировали при температуре таяния льда из дистиллированной воды в сосуде Дьюара.

Для измерения температуры потока воды на входе и выходе змеевика гидросистемы использовали термометры сопротивления КТСП-Н. Бездемонтажную калибровку термопар и термометров сопротивления осуществляли с помощью эталонного платинового термометра сопротивления ТСП-ОМ.

Расход пара определяли весовым методом — взвешиванием мерной емкости объемом 0.5 дм^3 на технических весах модели Меттлер Толодо с грузоподъемной чашкой Smart Pan и линейки ВЛЭ-С с дискретностью показаний 0.01 г . Температуру насыщенного пара контролировали по его давлению с помощью манометра типа ЭДМ с диапазоном измерений $0 - 1 \text{ МПа}$. Относительную влажность воздуха вычисляли с использованием цифрового гигрометра типа Волна-5П с погрешностью $\pm 2.5 \%$.

Скорость паровоздушной смеси на входе в опытный конденсатор $0.1 - 7.0 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при массовом содержании пара в смеси $0.05 - 0.9995 \text{ кг/кг}$ смеси, температура холодного теплоносителя (воды) $18 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$; расход воды $0.3 - 1.2 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^2 сечения ячейки-калориметра; расход воздуха $0.8 - 4.1 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 м^2 сечения ячейки-калориметра; расход пара $0.21 - 1.05 \text{ кг/т}$ воды через 1 м^2 сечения ячейки-калориметра; температура пара $104 \text{ }^\circ\text{C}$ при давлении $0.10 \pm 0.010 \text{ МПа}$ и плотности $0.625 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Полученные экспериментальные результаты обрабатывали по методике, изложенной в [13]. За счет теплоты конденсации пара Q_k (кВт) температура потока воды G_v ($\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$) в ячейке-калориметре увеличивается от T_{K1} на входе до T_{K2} на выходе. При низкой температуре эксперимента потери в окружающую среду от излучения теплоты корпусом калориметра незначительны. Плотность теплового потока

$$Q_k = G_v c_p \Delta T, \quad (1)$$

где c_p — изобарная теплоемкость воды, $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$; $\Delta T = (T_{K2} - T_{K1})$, К. Тепло от смешения воды с конденсатом пара составляет $< 1 \%$ и для практических расчетов пренебрежимо мало. Тогда, согласно закону Ньютона – Рихмана, при температуре насыщения паровоздушной смеси T_S и выходе температуры потока воды на стационарный режим при температуре стенки T_C значение коэффициента теплоотдачи α ($\text{кВт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$) находится по формуле

$$\alpha = \frac{Q_k}{F(T_S - T_C)}, \quad (2)$$

здесь F — площадь поверхности, воспринимающей теплоту Q_k , м^2 .

При статистической обработке результатов измерений доверительные границы измеряемой величины (Δx) рассчитывали в виде произведения табличного значения критерия Стьюдента (t_T) при доверительной вероятности $P = 0.95$ и среднего квадратического отклонения среднего арифметического ($S_{\bar{x}}$):

$$\Delta x = t_T S_{\bar{x}}. \quad (3)$$

ПОСТАНОВКА И МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решается задача повышения эффективности переработки минерального сырья методом флотации путем модификации технологических свойств пузырьков воздуха тепловым воздействием. Тонкие слои воды под влиянием молекулярного действия твердого тела приобретают состояние и свойства, отличные от объемных [14]. Силы, действующие в этих граничных слоях, относят к поверхностным [15]. Поверхность твердого тела оказывает влияние на удаленные слои жидкости путем передачи структурной информации на расстояние до десятых долей микрона [16], в том числе вблизи поверхности золота [17].

В зависимости от знака изменения свободной энергии при утончении смачивающей пленки до толщины граничного слоя с измененной структурой между телами возникают силы притяжения или силы отталкивания [18]. Первый случай называют гидрофобным взаимодей-

ствием [19, 20]. Для второго случая естественно предположить название гидрофильного взаимодействия. Последнее способно обеспечить длительную агрегативную устойчивость гидрофильных частиц.

При повышении температуры дисперсной системы структура в объеме воды изменяется в большей мере (так, уменьшается мольная доля соединенных водородными связями молекул по Nemethy и Scheraga [21, 22], заполняются пустоты тетраэдрического каркаса несвязанными молекулами воды по Самойлову, Danford и Levy [21, 22], водородная связь искажается у большей доли молекул по Pople [21, 22]), чем в защищенных поверхностью твердого тела граничных слоях воды. В результате свободная энергия граничного слоя уменьшается меньше, чем в объеме, что является причиной роста сил гидрофобного притяжения и гидрофильного отталкивания при повышении температуры.

Силы гидрофильного отталкивания могут быть сведены к избыточному осмотическому давлению между гидрофильными поверхностями [23], а избыточное осмотическое давление окружающей воды (пониженное осмотическое давление (декомпрессия [24]) между поверхностями) — к силам гидрофобного притяжения.

Таким образом, для повышения эффективности разделения минералов методом флотации достаточно повысить температуру в разделяющей частицу и пузырек слое жидкости (толщиной порядка 10–20 нм), в пределах которого локализовано действие поверхностных сил, а не всего объема пульпы.

Поставленная задача решается путем применения для флотации минералов смеси воздуха с горячим водяным паром. При внезапном контакте пузырька пара с холодной пульпой пар конденсируется и тепловой поток отводится в межфазную пленку, разделяющую пузырек и частицу. Сопряженные процессы нагрева межфазного слоя жидкости и контакта частицы с пузырьком должны протекать в одном интервале времени (соизмеримым со временем индукции [10–12]).

Расход греющего пара является основной статьей затрат при паровоздушной флотации. Для определения его рационального расхода примем, что фазу пара (с индексом “1”) и жидкости (с индексом “2”) разделяет поверхность (поверхность теплообмена) с площадью F , равной суммарной поверхности пузырьков воздуха. При прохождении вдоль нее массовая доля пара в паровоздушной смеси ϖ изменяется от ϖ_{10} до ϖ_1 , а температура несущей среды от T_{20} до T_2 . При переходе к дифференциально малому участку поверхности теплообмена dF теплофизические свойства насыщенного пара с температурой $T_{n1} = \text{const}$ (массовая доля пара в паровоздушной смеси — ϖ , д.е., расход — G , кг·с⁻¹, удельная теплота парообразования — r , кДж·кг⁻¹) изменяются от ϖ_1, G_1, r_1 до $\varpi_1 + d\varpi_1, G_1, r_1$:

$$\frac{d\varpi_1}{dF} = -\frac{\alpha}{r_1 G_1} (T_{n1} - T_2). \quad (4)$$

При условии сохранения баланса энергий в жидкой фазе переход через dF сопровождается изменением температуры (T , К), расхода (G , кг·с⁻¹) и удельной теплоемкости (c , Дж·кг⁻¹·К⁻¹) воды от t_2, G_2, c_2 до $t_2 + dt_2, G_2, c_2$:

$$\frac{dT_2}{dF} = \frac{\alpha}{c_2 G_2} (T_{n1} - T_2). \quad (5)$$

В системе уравнений (4) и (5) α — коэффициент теплоотдачи, величина которого определяется экспериментально по описанной выше методике.

Производную dR_b / dt в уравнении скорости переноса теплоносителя через поверхность тепломассообмена при внезапном контакте с холодной водой [25]

$$v_{1s} = \frac{dR_b}{dt} + \frac{j}{\rho_{1s}}, \tag{6}$$

где j — массовый поток пара через границу раздела фаз, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; ρ_{1s} — плотность насыщенного пара, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$), найдем, продифференцировав по времени t зависимость

$$R_b = 3.744 - 0.330t, \tag{7}$$

полученную аппроксимацией результатов исследования изменения размера пузырьков (R_b , мм) со временем $t = 0 - 10$ мкс при барботировании холодной воды паром через сопло $\varnothing 1$ мм и давлении 0.2 МПа [26]. Расход пара

$$G_2 = c_{1s} \rho_{1s} v_{1s} F (T_s - T_c). \tag{8}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Решением системы (4), (5) разработанным в [27] методом, установлено, что в условиях флотации ($R = 1.0 \cdot 10^{-3}$ м, $\varphi = 0.15$, $r_1 = 2230$ кДж·кг⁻¹, $t_{n1} = 377$ К, $t_{20} = 291$ К, $c_1 = 2177$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹, $c_2 = 4183$ Дж·кг⁻¹·К⁻¹) значение коэффициента теплоотдачи к воде α уменьшается с ростом теплового напора ΔT (рис. 2) и снижением расхода пара с 0.41 (рис. 3, кривая 1) до 0.30 кг/кг воздуха (кривая 2). Полученные экспериментальные данные не противоречат результатам моделирования тепломассообменных процессов в двухфазных парожидкостных средах [28].

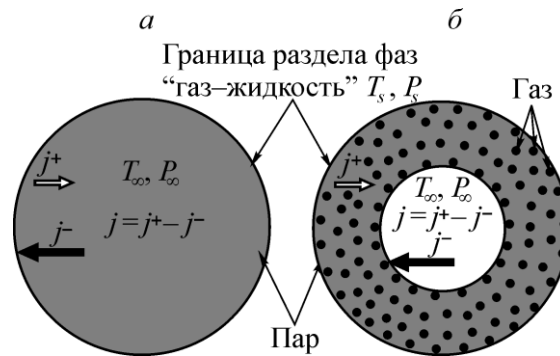


Рис. 2. Схема движения конденсирующихся \blackrightarrow (j^-) и испаряющихся \redrightarrow (j^+) тепловых потоков в паровоздушном пузырьке

При внезапном контакте пузырька, заполненного смесью воздуха с горячим водяным паром (рис. 2), с холодной водой в нем образуется два аддитивных потока массы, определяющих плотность теплового потока ($j = j^+ - j^-$): направленного к межфазной поверхности (j^- , кВт·м⁻²) и встречного, образованного молекулами испаряющегося вещества несущей жидкой фазы (j^+ , кВт·м⁻²).

Поверхность пузырька совершает поверхностные колебания с различными гармониками. Тепло, полученное поверхностным слоем воды, за счет перемешивания и обновления поверхности передается в объем жидкости (рис. 2а). В первую очередь конденсируется пар из слоя паровоздушной смеси, прилегающего к поверхности тепломассообмена. Уменьшение концентрации пара в приповерхностном слое приводит к росту в нем концентрации неконденсирующегося воздуха. Подвод пара из удаленных слоев паровоздушной смеси к поверхности тепломассообмена

оказывается возможен только за счет диффузии [28] (рис. 2б). В пределе пар концентрируется в центре пузырька, что приводит к ухудшению теплообмена. При уменьшении массовой доли пара в паровоздушной смеси передаваемый ею в теплообменном аппарате тепловой поток уменьшается (рис. 2б).

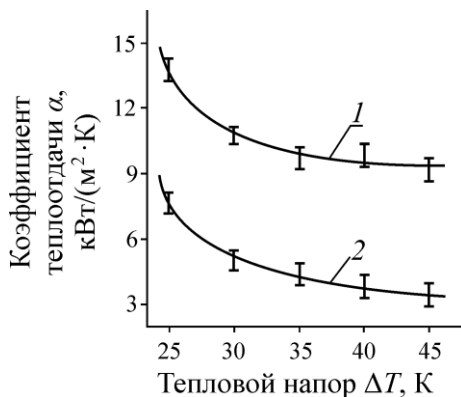


Рис. 3. Коэффициент теплоотдачи α как функция теплового напора ΔT

Увеличение поверхности теплообмена F с ростом расхода паровоздушной смеси от $2.58 \cdot 10^{-2}$ (рис. 4, кривая 1) до $4.78 \cdot 10^{-2}$ $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (рис. 4, кривая 3) приводит к уменьшению массовой доли пара в барботируемом теплоносителе (рис. 4).

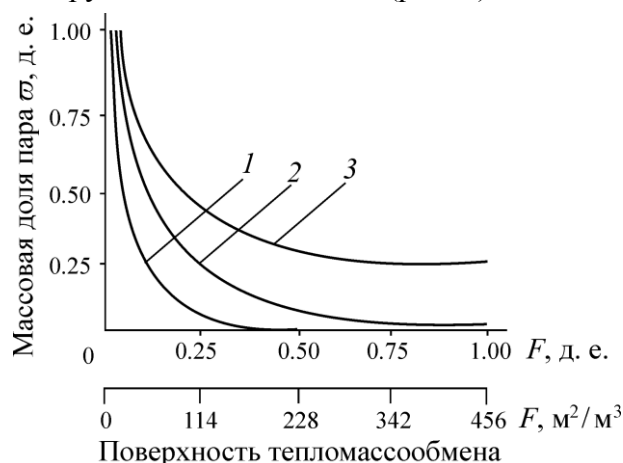


Рис. 4. Массовая доля пара в паровоздушной смеси ω как функция поверхности теплообмена F

Оптимальным является расход пара, при котором поверхность теплообмена $F \rightarrow \max$, а массовая доля пара в паровоздушной смеси $\omega \rightarrow \min$. При заданных теплофизических условиях моделирования расход пара $1.07 \cdot 10^{-2}$ и воздуха $2.61 \cdot 10^{-2}$ $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ является оптимальным (рис. 4, кривая 2), так как практически весь подводимый пар ($\omega \approx 0$) претерпевает фазовый переход, теплота которого расходуется на нагрев воды в граничном слое межфазной поверхности “газ–жидкость” ($F \rightarrow 1$). При уменьшении расхода пара на $\sim 30\%$ (до 0.749 $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) для отвода теплоты конденсации за счет теплоемкости воды в граничные слои пузырьков достаточно $\sim 50\%$ их поверхности (рис. 4, кривая 1). При увеличении расхода пара в 1.3 раза (до 1.39 $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$) имеющейся поверхности теплообмена оказывается недостаточно для полной конденсации пара и его избыток ($\omega \approx 0.25$) вместе с пузырьками прорывается через слой жидкости в атмосферу (рис. 4, кривая 3). В этом случае визуально заметно парение над поверхностью воды во флотомашине, что связано с проскоком пузырька пара через слой воды в виде выпара. Количество выпара

в системах деаэрации составляет 5–7 кг/т деаэрированной воды [29]. Эффект связан с предельным количеством неконденсирующегося газа вблизи поверхности теплообмена, при котором она становится непроницаемой для потока тепла: наступает запирающий режим конденсации (рис. 2б) с нулевой скоростью потока тепла у поверхности пузырька [30].

При исследовании кинетики нагрева воды в граничном слое пузырька принята модель взаимодействия пара и холодной воды [31, 32], в соответствии с которой в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ газовая и жидкая фазы находятся при одинаковом давлении p_0 , но разной температуре $T_1 \gg T_2$, разделены теплоизолирующей перегородкой. Если теплоизолирующую перегородку мгновенно убрать, то на плоской неподвижной межфазной границе начинается нестационарная конденсация пара. В результате уменьшается давление в паре и на межфазной поверхности можно ожидать

$$\rho_{1,12} = \frac{\partial u_{1,12}}{\partial t} = \frac{\partial p_{12}}{\partial x} = \frac{1}{c_1} \frac{\partial p_{12}}{\partial t}. \tag{9}$$

Интегрирование (9) с учетом теплового потока на межфазной границе

$$q_{12} = -\lambda_2 \int_0^t \frac{\frac{\partial T_{12}}{\partial \tau}}{\sqrt{\pi a_2 (t-\tau)}} d\tau \tag{10}$$

дает уравнение теплопроводности

$$\frac{1}{c_1} (p_{12} - p_0) = \frac{\lambda_2 T_2 c_1}{r^2 \rho_1 \sqrt{a_2 t}} [p_s(t_{12}) - p_{12}] = -\frac{\lambda_2}{r} \int_0^t \frac{\frac{\partial T_{12}}{\partial \tau}}{\sqrt{\pi a_2 (t-\tau)}} d\tau, \tag{11}$$

описывающее нагрев граничного слоя воды при конденсации пара на межфазной поверхности.

В расчетах использованы эмпирические соотношения для определения теплофизических параметров смеси пара с неконденсирующимися газами (паровоздушной смеси) [33–35]. Из результатов численного моделирования следует (рис. 5а), что в интервале времени $1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5}$ с температура поверхности воды резко увеличивается, затем также быстро уменьшается, асимптотически приближается к температуре пара в интервале времени $2 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-5}$ с, оставаясь на 3–4 °С ниже.

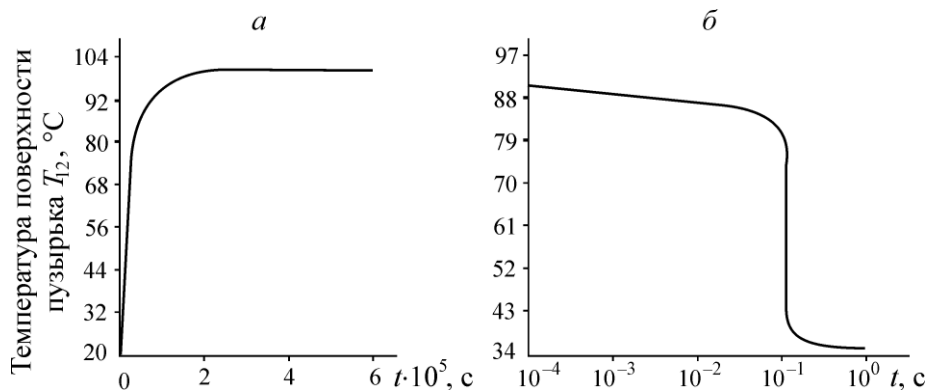


Рис. 5. Температура поверхности пузырька как функция времени процесса конденсации пара

Нестационарная конденсация в макроскопическом масштабе времени является быстропротекающим процессом, что позволяет при ее исследовании принять допущение о плоской неподвижной теплообменной поверхности [36, 37]. На стадии исследования регулярного теплового процесса необходимо учитывать, что конденсация осуществляется на поверхности всплывающего пузырька, в условиях перемешивания воды в граничном слое.

Уравнение Ньютона – Рихмана, описывающее теплообмен между паром в сферическом пузырьке и окружающей жидкостью, можно записать в виде

$$\frac{dT_{12}}{dt} = \frac{3\alpha}{c_1 R(x, T) \rho_1(x, T)} (T_2 - T_1). \quad (12)$$

Получено (рис. 5б), что температура пара в пузырьке к моменту времени $t = 0.1 - 1.0$ с отличается от температуры окружающей воды на $10 - 14$ °С и составляет $36 - 40$ % от разницы между начальными температурами пара и жидкости.

При коэффициенте температуропроводности пара $a = 18.58 \text{ м}^2 \cdot \text{с}$ время выравнивания температуры пара в пузырьках размером $R = (1.0 - 1.5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ с площадью поверхности $F = (12.56 - 18.84) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ в неравновесном тепловом процессе их взаимодействия с холодной водой составляет $0.7 - 1.0$ с. Однако добавка к пару неконденсирующегося газа – воздуха – приводит к значительному снижению скорости теплообмена и конденсационной мощности [36]:

$$\alpha_{gv} = \alpha_v (0.102 - 0.104\varepsilon), \quad (13)$$

где α_v , α_{gv} — коэффициент теплоотдачи пара и смеси пара с воздухом при долевой концентрации воздуха ε . Увеличение в присутствии неконденсирующегося воздуха времени перехода пара от метастабильного состояния к состоянию, близкому к равновесному, позволяет предположить, что передача теплоты от пара в пузырьке к воде и взаимодействие пузырька с частицей при флотации происходят в одном интервале времени.

Из практики колонной флотации следует, что при избыточном расходе воздуха поступление газовой фазы в объем аппарата в виде отдельных пузырьков сменяется ее струйным истечением — последующий пузырек попадает в след предыдущего пузырька. При струйном движении (и при дальнейшем увеличении расхода воздуха — поршневом режиме истечения) происходит ускоренный выброс газовой фазы из аппарата в виде крупных пузырьков, всплывающих при больших числах Рейнольдса, что не соответствует условиям эффективного теплообмена, роста производительности и избирательности процесса разделения частиц.

При оптимальном соотношении теплоносителей теплообмен в калориметре (флотомашине) организован таким образом, что подведенная теплота к теплоприемным элементам калориметра — граничным микрослоям воды у поверхности раздела фаз “газ – жидкость” затрачивается на изменение их энтальпии при минимальном отводе теплоты от флотомашины ($\varpi \rightarrow 0$). При флотации требование полноты конденсации пара в пузырьках ($\varpi \rightarrow 0$) должно выполняться при условии, что при заданном газосодержании ($\varphi = \varphi_{\text{зад}}$) поток пульпы через рабочую зону аппарата максимален ($G_2 \rightarrow \text{max}$).

График рис. 6 получен обработкой результатов исследования процесса сопряженного теплообмена с использованием модели (4), (5). На рис. 5 точки, принадлежащие прямой, соответствуют расходам теплоносителей, при которых $\varpi \approx 0$.

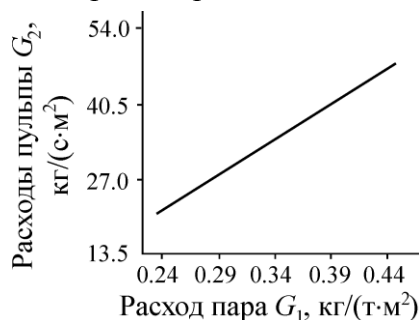


Рис. 6. Минимальная массовая доля пара в паровоздушной смеси ($\varpi \approx 0$) в зависимости от расхода пара G_1 и пульпы G_2

Для точек, лежащих левее прямой рис. 6, характерны высокие расходы пульпы через рабочую зону флотомашин и воздуха и низкие значения коэффициентов теплоотдачи. В паровоздушной смеси избыток неконденсирующегося воздуха накапливается вблизи межфазной поверхности и плотность потока массы конденсирующегося пара к ней уменьшается (рис. 3б). Снижение теплоотдачи при флотации приводит к выводу неконденсирующейся части пара из флотомашин и снижению технологического эффекта от его использования. Увеличение теплообмена за счет понижения температуры межфазной границы при высоких расходах холодных теплоносителей сдерживается рациональной для практики колонной флотации приведенной скоростью пульпы (0.5 – 1.5 см/с) и воздуха (1.0 – 2.5 см/с).

Точкам, лежащим правее прямой рис. 6, соответствует расход пара, поверхность теплообмена для полной конденсации которого недостаточна (рис. 4, кривая 3) и его избыток выводится из флотомашин. В условиях основной флотации рациональным является увеличение коэффициента теплоотдачи за счет увеличения расхода воздуха, а в операции перерешетки концентрата — увеличение производительности по пульпе.

На основе анализа полученных данных (рис. 2, 4, 6), при флотации пробы золотосодержащих руд апробирован режим флотации с подачей в аэратор флотомашин колонного типа пара; расход пара принят $0.34 \text{ кг} \cdot \text{т}^{-1}$ исходной пульпы.

С применением схемы и реагентного режима, рекомендуемого для обогащения руд [22, 38, 39], из пробы руды в концентрат, содержащий 86.78 г/т золота при выходе 2.98 %, извлечено 85.07 % металла. Повышение достигнутых технологических показателей обогащения руд возможно путем оптимизации условий разделения в операциях основной флотации и перерешетки черного концентрата.

В существующих схемах флотации в операцию основной флотации направляют хвосты I перерешетки и концентрат контрольной флотации, что объясняется примерно одинаковым содержанием в них извлекаемого компонента. Однако извлекаемые минералы в исходном сырье и промежуточных продуктах различаются по флотуемости: скорость флотации медленно флотируемой фракции ценного компонента и быстро флотируемой фракции подавляемого минерала выравниваются и фракции примерно с одинаковой интенсивностью переходят в концентрат. Появление при смешении распределения извлекаемых минералов по флотуемости (понижение контрастности) приводит к увеличению их потерь с хвостами флотации.

В настоящей работе для повышения контрастности материала по флотуемости в операцию основной флотации направляют концентрат, для выделения которого из материала промпродуктов схему флотации дополняют операцией флотации промпродуктов.

Следствием извлечения ценных минералов в концентрат с различной интенсивностью (при смешении флотоактивных минералов в питании с трудноизвлекаемыми (упорными) формами минералов в промпродуктах) является распределение их по времени пребывания во флотомашине. Отсутствие распределения извлекаемых минералов и близость результата разделения к результату периодического процесса (с высоким извлечением и качеством концентрата) служит отличием аппарата с идеальным вытеснением от аппарата с идеальным перемешиванием. Минимальная скорость радиального перемешивания во флотомашине колонного типа позволяет рассматривать ее как аппарат с идеальным вытеснением с характерными для него преимуществами.

С целью повышения достигнутых технологических показателей перерешетки концентрата основной флотации выполняли в колонной флотационной машине с аэратором конфузоро-диффузорного типа для подачи смеси воздуха с водяным паром (рис. 7).

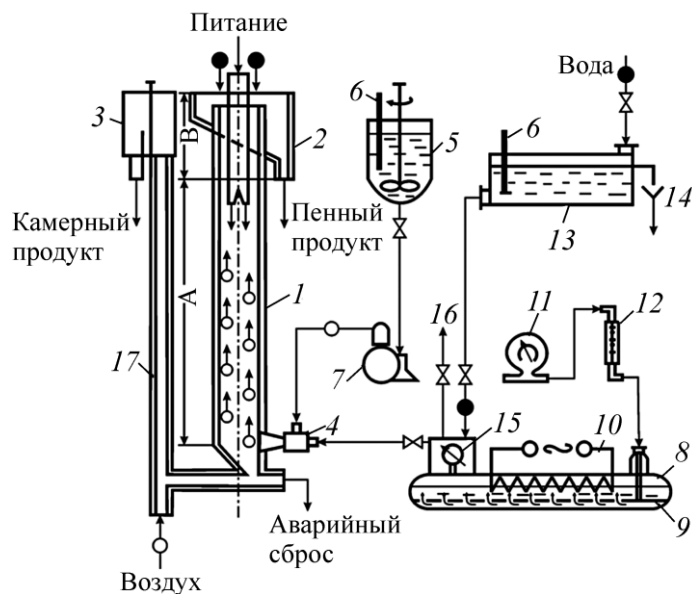


Рис. 7. Схема цепи аппаратов лабораторного стенда для флотации паровоздушной смесью: 1 — флотационная колонна; 2, 3 — приемники продуктов разделения; 4 — пневмогидравлический аэратор конфузор-диффузорного типа; 5–7 — линия инъекции раствора пенообразователя; 8–10 — парогенератор (8) с системой барботажа воздуха (9) и электронагрева воды (10); 11, 12 — линия подачи и контроля расхода воздуха; 13, 14 — линия подачи воды с постоянным напором; 15, 16 — линия контроля расхода (15) и сброса избытка (16) паровоздушной смеси

Измельчение руд осуществляли в две стадии (до 40.3 % кл. – 74 мкм в первой и до 85.7 % кл. – 74 мкм во второй) в стержневой мельнице размером $D \times L = 163 \times 220$ мм при отношении Т:Ж = 1:1 и загрузке в нее 9 кг стержней $\varnothing 15 - 30$ мм. Из продуктов измельчения на концентрационных столах (типа 30А-КЦМ в операции основной концентрации и СКЛ2 в операции перечистки концентрата) выделен гравикоцентрат с содержанием золота 73.19 г/т при извлечении 20.08 %.

Флотацию хвостов гравитации проводили во флотомашине механического типа с объемом камеры 3 дм³ при числе оборотов импеллера (вогнутый диск $\varnothing 68$ мм с четырьмя радиальными лопатками и ступицей) 1863 об/мин и расходе воздуха 1.14 м³/мин на 1 м³ объема камеры. Золото извлекали бутиловым ксантогенатом калия и Т-80 в щелочной среде (загрузка соды до рН 8.5–8.7) после активации сульфидов медным купоросом. Получен черновой концентрат с содержанием 26.73 г/т Au при извлечении 68.69 %.

Черновой концентрат перечищали во флотационной колонне $\varnothing 6.4$ см с высотой зоны минерализации 2.1 м и высотой зоны очистки 0.60 м при противоточном движении исходного питания и газовой фазы. В пневмогидравлическом аэраторе рабочий газовый поток через конфузор $\varnothing 1$ мм поступает в коническую камеру смешения (с горловиной) с расширяющимся диффузором $\varnothing 5.1$ мм на выходе общей длиной 15.2 см. В камеру смешения через патрубок $\varnothing 1.47$ мм подается раствор ксантогената под давлением 12.7 кПа. Аэратор вынесенный, боковой, донный.

Производительность колонны по пульпе при перечистке черного концентрата составляла 31.5 кг·с⁻¹ на 1 м² сечения колонны. На аэрацию подавали $26.1 \cdot 10^{-3}$ кг·с⁻¹ воздуха из расчета на 1 м² сечения колонны и $10.7 \cdot 10^{-3}$ кг·с⁻¹ пара с температурой 104 °С и давлением 218 кПа (0.34 кг·т⁻¹ исходной пульпы). Из водного баланса колонны следует, что при расходе промывной воды 0.34 м³/мин на 1 м² сечения колонны поток воды в хвосты превышал поток воды в питание на 7–8 %, что позволяло подавлять механический вынос нефлотируемых минералов

в концентрат. На перемешивание подавали бутиловый ксантогенат калия из расчета 25 мг/дм³. Давление воздуха на входе в эрлифт 0.14 МПа при расходе 0.045 м³ на 1 м³ удаляемой в хвосты пульпы. Удельный расход электроэнергии 0.34 кВт/м³ пульпы.

На рис. 8 приведена рекомендуемая качественно-количественная схема флотации руд, полученная по результатам флотации в условиях, моделирующих замкнутый цикл. Опыт состоял из 6 заворотов промежуточных продуктов, при которых достигнута стабилизация содержания золота в отвальных хвостах. Сравнение достигнутых показателей обогащения руд (рис. 8) с ранее полученными [22, 38, 39] позволяет сделать следующие выводы. В концентрат извлечено 88.47% золота (в том числе 20.72% в концентрат гравитации); при выходе концентрата 2.11% в нем содержится 125.79 г/т золота.

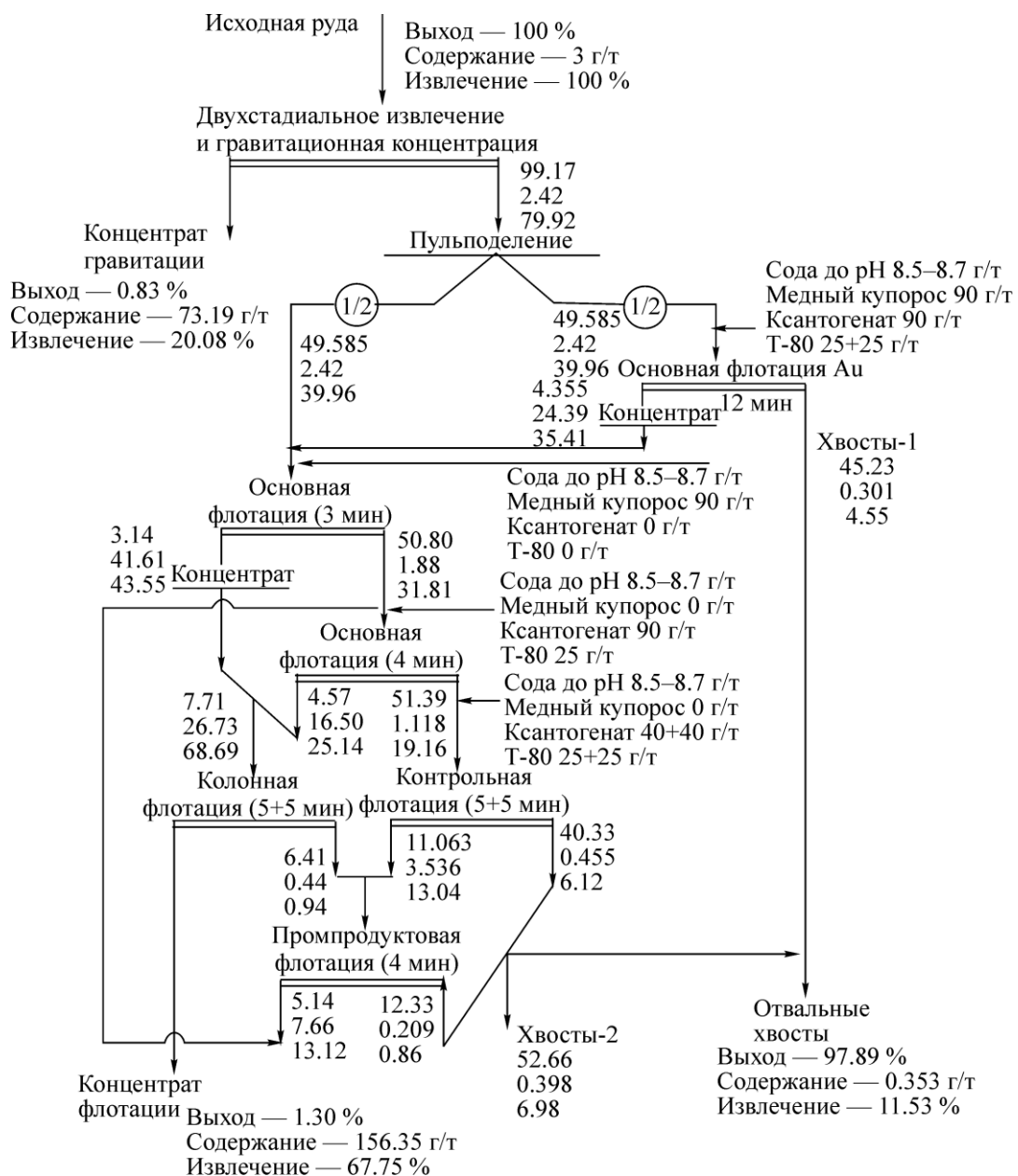


Рис. 8. Качественно-количественная схема флотации руд по результатам опыта, моделирующего замкнутый цикл флотации

Применение одной перечистки черного концентрата в колонной флотомашине вместо двух перечисток во флотомашине механического типа позволило увеличить извлечение золота от операции с 76.8 до 89.9%; содержание золота в концентрате флотации увеличилось в 1.8 раза при уменьшении выхода флотоконцентрата на $\left(100 - \frac{1.30}{2.15} 100\right) = 39.5\%$ отн.

Введение операции флотации промпродуктов — хвостов I перечистки и концентрата контрольной флотации позволило уменьшить разубоживание питания основной флотации путем уменьшения на $> 38\%$ отн. выхода промпродуктов, возвращаемых в операцию основной флотации. В результате извлечение золота во флотоконцентрат выросло на 2.76% (с 64.99 до 67.75%) за счет уменьшения потерь золота с отвальными хвостами на $\left(100 - \frac{11.53}{14.93} \times 100\right) = 22.8\%$ отн.

ВЫВОДЫ

Разработан способ флотации, при котором для изменения устойчивости смачивающих пленок используют теплоту конденсации водяного пара. Данный способ реализуется путем аэрации пульпы смесью воздуха с горячим водяным паром. Можно предположить, что один из механизмов флотации в этих условиях связан с тем, что при контакте частицы с заполненным паром пузырьком разделяющая их смачивающая пленка нагревается за счет теплоты конденсации водяного пара. Проведены измерения коэффициента теплоотдачи при различном температурном напоре, расходе пара и площади теплообмена, выявлены причины и факторы полной конденсации пара в паровоздушной смеси. Полученные результаты позволили определить расход пара, при котором аэрация пульпы паровоздушной смесью осуществляется в энергосберегающем режиме. Разработанный режим аэрации пульпы апробирован в лабораторных условиях в операции перечистки черного концентрата при флотации золотосодержащих руд. Достигнутые показатели позволяют рекомендовать способ флотации паровоздушной смесью для применения в практике обогащения золотосодержащих руд с целью повышения технологических показателей их обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирзеханов Г. С., Мирзеханова З. Г. Прогнозная оценка ресурсного потенциала гале-эфельных отвалов россыпных месторождений золота дальнего востока России // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 111–120.
2. Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Александров А. В. Применение микроволновой обработки для снижения степени упорности углеродистых концентратов // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 148–154.
3. Матвеева Т. Н., Громова Н. К., Ланцова Л. Б. Анализ комплексообразующих и адсорбционных свойств дитиокарбаматов на основе циклических и алифатических аминов для флотации золотосодержащих руд // ФТПРПИ. — 2020. — № 2. — С. 121–127.
4. Гаврилова Т. Г., Кондратьев С. А. Влияние физической формы сорбции собирателя на активацию флотации сфалерита // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 131–143.
5. Хуайфа В., Бочкарев Г. Р., Ростовцев В. И., Вейгельт Ю. П., Лу Шоуци. Интенсификация обогащения полиметаллических сульфидных руд высокоэнергетическими электронами // ФТПРПИ. — 2002. — № 5. — С. 96–103.

6. Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Рязанцева М. В., Чантурия Е. Л., Хабарова И. А., Копорулина Е. В., Анашкина Н. Е. Модификация структурно-химических и технологических свойств минералов редких металлов при воздействии высоковольтных наносекундных импульсов // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 117–134.
7. Алгебраистова Н. К., Бурдакова Е. А., Романченко А. С., Маркова А. С., Колотушкин Д. М., Антонов А. В. Исследование влияния разрядно-импульсной обработки на структурно-химические свойства сульфидных минералов и их флотируемость // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 145–152.
8. Albrecht T. W. S., Addai-Mensah J., and Fornasiero D. Critical copper concentration in sphalerite flotation: Effect of temperature and collector, *Int. J. of Miner. Proc.*, 2016, Vol. 146. — P. 15–22.
9. Кондратьев С. А., Изотов А. С. Влияние углеводородных масел на образование флотационного комплекса “частица – пузырек” // ФТПРПИ. — 2001. — № 2. — С. 87–92.
10. Verrelli D. I., Koh P. T. L., Bruckard W. J., and Schwarz M. P. Variations in the induction period for particle–bubble attachment, *Miner. Eng.*, 2012, Vol. 36–38. — P. 219–230.
11. Xia W. Role of surface roughness in the attachment time between air bubble and flat ultra-low-ash coal surface, *Int. J. of Miner. Proc.*, 2017, Vol. 168. — P. 19–24.
12. Albijanic B., Ozdemir O., Nguyen A. V., and Bradshaw D. A review of induction and attachment times of wetting thin films between air bubbles and particles and its relevance in the separation of particles by flotation, *Advances in Colloid and Interface Sci.*, 2010, Vol. 159. — P. 1–21.
13. Шихалев С. В., Минухин Л. А., Решетников И. Ф. Процессы тепло- и массоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на горизонтальной плоской поверхности аппаратов с рубашкой // Техника и технология пищевых производств. — 2014. — № 3. — С. 103–107.
14. Miller J. D., Wang X., Jin J., and Shrimali K. Interfacial water structure and the wetting of mineral surfaces, *Int. J. of Miner. Proc.*, 2016, Vol. 156. — P. 62–68.
15. Boinovich L. and Emelyanenko A. Wetting and surface forces, *Advances in Colloid and Interface Sci.*, 2011, Vol. 165, No. 2. — P. 60–69.
16. Zheng J.-M., Chin W.-C., Khijniak E., Khijniak E., and Pollack G. H. Surfaces and interfacial water: Evidence that hydrophilic surfaces have long-range impact, *Advances in Colloid and Interface Sci.*, 2006, Vol. 127, Issue 1. — P. 19–27.
17. Pan L., Jung S., and Yoon R.-H. Effect of hydrophobicity on the stability of the wetting films of water formed on gold surfaces, *J. of Colloid and Interface Sci.*, 2011, Vol. 361, Issue 1. — P. 321–330.
18. Liang Y., Hilal N., Langston P., and Starov V. Interaction forces between colloidal particles in liquid: Theory and experiment, *Advances in Colloid and Interface Sci.*, 2007, Vol. 134–135. — P. 151–156.
19. Liu J., Cui X., Xie L., Huang J., and Zeng H. Probing effects of molecular-level heterogeneity of surface hydrophobicity on hydrophobic interactions in air/water/solid systems, *J. of Colloid and Interface Sci.*, 2019, Vol. 557. — P. 438–449.
20. Mishchuk N. The model of hydrophobic attraction in the framework of classical DLVO forces, *Advances in Colloid and Interface Sci.*, 2011, Vol. 168, Issues 1–2. — P. 149–166.
21. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 280 с.
22. Евдокимов С. И., Паньшин А. М., Солоденко А. А. Минералургия. В 2-х т. Т. 2. // Успехи флотации. — Владикавказ: ООО НПКП “МАВР”, 2010. — 992 с.
23. Ролдугин В. И. О едином механизме действия поверхностных сил различной природы // Коллоид. журн. — 2015. — Т. 77. — № 2. — С. 214–218.
24. Ролдугин В. И., Харитонова Т. В. Осмотическое давление или декомпрессия? // Коллоид. журн. — 2015. — Т. 77. — № 6. — С. 783–791.

25. **Маркина Н. Л., Ревизников Д. Л., Черкасов С. Г.** Математическая модель сопряженного тепло-массообмена парогазового пузырька с окружающей жидкостью // Вестн. Московского авиационного института. — 2009. — Т. 16. — № 2. — С. 71–78.
26. **Королев А. В.** Особенности скачка давления в пароводяных инжекторах // Энергетика. Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. — 2009. — № 6. — С. 42–47.
27. **Барочкин Е. В., Жуков В. П., Ледуховский Г. В., Отвиновски Х.** Метод расчета многоступенчатых теплообменных аппаратов с учетом фазового перехода // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2004. — Т. 47. — Вып. 2. — С. 170–173.
28. **Абед А. Х., Щеклеин С. Е., Пахалуев В. М.** Теплообмен сферического элемента с водовоздушным потоком аэрозоля в цилиндрическом потоке // Теплофизика и аэромеханика. — 2020. — Т. 27. — № 1. — С. 109–119.
29. **Шарапов В. И., Малинина О. В.** Определение теоретически необходимого количества выпара термических деаэраторов // Теплоэнергетика. — 2004. — № 4. — С. 63–66.
30. **Крюков А. П., Левашов В. Ю.** Конденсация на плоской поверхности из парогазовой смеси // Теплофизика высоких температур. — 2008. — Т. 46. — № 5. — С. 765–770.
31. **Лежкин С. И., Сорокин А. Л.** Моделирование эволюции импульса разрежения при контакте холодной жидкости и насыщенного пара // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17. — № 3. — С. 397–400.
32. **Лежкин С. И., Сорокин А. Л., Прибатурин Н. А.** Эволюция давления и температуры при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара // Тр. Института механики УНЦ РАН. — 2007. — С. 261–266.
33. **Бахметьев А. М., Большухин М. А., Хизбуллин А. М., Камнев М. А.** Экспериментальные исследования теплоотдачи при конденсации пара из паровоздушной смеси на теплообменной поверхности системы снижения аварийного давления в защитной оболочке // Теплофизика и теплогидравлика. — 2011. — № 4. — С. 64–71.
34. **Крюков А. П., Левашов В. Ю., Павлюкевич Н. В.** Конденсация из парогазовой смеси // Инженерно-физ. журн. — 2010. — Т. 83. — № 4. — С. 637–644.
35. **Нефёдова Н. И., Горяев А. Б., Данилов О. Л.** Моделирование процесса конденсации пара из парогазовой смеси на вертикальной пластине // Промышл. теплотехника. — 2003. — Т. 25. — № 4. — С. 415–417.
36. **Шихалев С. В., Минухин Л. А., Решетников И. Ф.** Процессы тепло- и массоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на горизонтальной плоской поверхности аппаратов с рубашкой // Техника и технология пищевых производств. — 2014. — № 3. — С. 103–107.
37. **Крюков А. П., Ястребов А. К.** Анализ процессов переноса в паровой пленке при взаимодействии сильно нагретого тела с холодной жидкостью // Теплофизика высоких температур. — 2003. — Т. 41. — № 5. — С. 771–778.
38. **Евдокимов С. И., Дациев М. С., Подковыров И. Ю.** Разработка новой схемы и способа флотации руд Олимпиадинского месторождения // Изв. вузов. Цв. металлургия. — 2014. — № 1. — С. 3–11.
39. **Евдокимов С. И., Евдокимов В. С.** Повышение извлечения золота на основе совместной переработки руды и отходов // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 160–169.

Поступила в редакцию 03/II 2021

После доработки 14/III 2021

Принята к публикации 15/III 2021