

## Экспериментальное исследование финишного этапа обогащения кварца в плазменных потоках

© Ю.М. Гришин, Н.П. Козлов, А.Ю. Кулагин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Представлены результаты экспериментального исследования процессов плазменной обработки кварцевых частиц в аргоновой струе стационарных электродуговых плазмотронов различного типа и мощности. Установлены особенности модификации гранулометрического состава, структуры и химического состава твердофазных примесей и газожидкостных включений перерабатываемых концентратов. Определены условия осуществления процесса, при которых может быть получен особо чистый кварцевый концентрат.*

**Ключевые слова:** *низкотемпературная плазма, обогащение, особо чистый кварц, плазмотрон.*

**Введение.** В настоящее время во многих странах резко возросло потребление промышленностью кварцевых концентратов повышенной чистоты, а именно особо чистого кварца (ОЧК). Это продиктовано, с одной стороны, развитием высоких технологий, с другой стороны, возросшими потребностями традиционных областей использования данного вида сырья [1].

Одним из перспективных направлений производства концентрата ОЧК могут стать технологии с применением плазменного метода. Предложенная в [2] технология включает в себя этапы предварительного и глубокого обогащения природного кварца и этап финишной доводки. Этап предварительного обогащения включает переработку исходного сырья методами дробления, грохочения, фотометрической и рентгенолюминесцентной сепарации. Глубокое обогащение включает в себя последовательное осуществление процессов измельчения, рассева, магнитной и электромагнитной сепарации и гравитационное обогащение. На первых двух этапах используется многостадийная технология, включающая хорошо отработанные физико-химические методы. В результате получается глубоко обогащенный кварцевый концентрат — крупка размерами 100...400 мкм с суммарной концентрацией примесей 20...120 ppm. На заключительном этапе технологического процесса, на котором требуется снизить концентрацию примесей до значений менее 20 ppm, предлагается использовать плазменный метод обогащения. После плазменной обработки кварцевый концентрат последовательно подвергается химическому травлению, промывке с ультразвуковой обработкой, обезвоживанию и сушке. В результате на выходе получается концентрат ОЧК размерами 100...400 мкм.

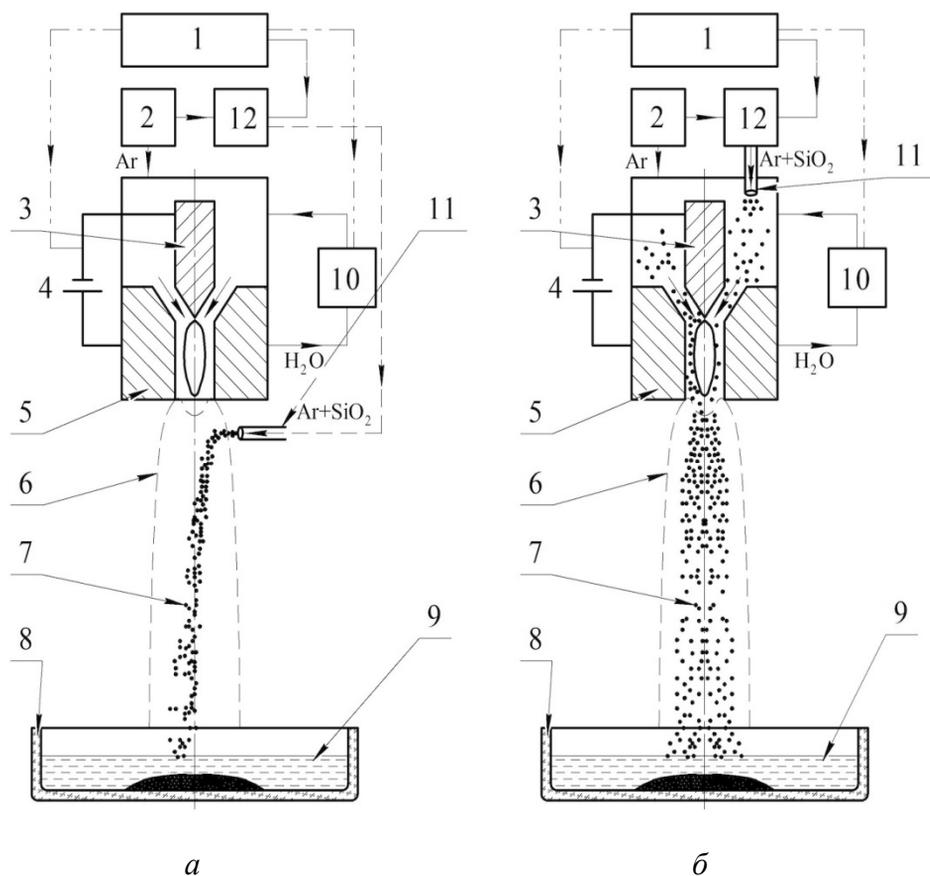
Плазменный метод [3, 4] основан на обработке мелкодисперсных (размером 100...400 мкм) частиц промежуточного кварцевого концентрата в высокотемпературной (~10 000 К) плазменной струе, генерируемой стационарным плазмотроном. Главной особенностью и достоинством плазменного метода является высокий уровень поступающих на частицу потоков энергии ( $10^7 \dots 10^8$  Вт/м<sup>2</sup>) при нестационарном (время обработки  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  с) нагреве частиц до температур ниже температуры плавления кварца.

В результате действия различных физико-химических механизмов, таких как плазменная десорбция и испарение примесей с поверхности частиц, раскол и растрескивание частиц (из-за возникающих термобарических напряжений [5, 6]) со вскрытием внутренних полостей (вакуолей) и выводом содержащихся в них флюидных примесей газожидкостных включений (ГЖВ) и т.д., происходит удаление различных минеральных элементов примесей и ГЖВ из твердофазных частиц кварца. Кварцевая крупка, проходя обработку в сформированном газоплазменном дисперсном потоке, этим же потоком транспортируется в сборник продукта. Далее после ультразвуковой обработки, промывки, обезвоживания и сушки получается окончательный продукт — концентрат ОЧК с суммарным содержанием примесей на уровне 10...20 ppm.

Разработка на базе плазменного метода технологического процесса обогащения природного кварца с получением ОЧК требует проведения широкого комплекса экспериментальных исследований в целях изучения влияния на эффективность плазменного обогащения индивидуальных свойств кварцевого сырья, его исходной дисперсности и степени загрязненности, конструктивных особенностей используемых генераторов плазмы и их энергетических характеристик.

**Экспериментальные установки.** Экспериментальные исследования эффективности обогащения кварцевого концентрата проведены на плазменной установке Sulzer Metco Plasma Technik M1000 (мощностью до 55 кВт) с подачей перерабатываемого кварца на срез выходного сопла плазмотрона и на специально разработанной микроплазменной установке мощностью до 3 кВт с подачей кварцевого концентрата непосредственно в дугу электрического разряда. Схемы экспериментальных установок представлены на рис. 1. Обе установки включали в себя электродуговой генератор плазмы атмосферного давления со стабилизацией разряда между катодом 3 и анодом 5. В электрическую систему помимо электродного узла входила система электропитания 4. Охлаждение электродов обеспечивалось водяной системой охлаждения 10, состоящей из рубашки охлаждения теплонапряженных элементов конструкции, уплотнений, каналов для организации потока охлаждающей среды, внешней системы отвода тепла. Ввод основного и

транспортирующего газов в разрядную камеру плазмотрона и канал инжектора 11, подача обрабатываемого кварцевого порошка из дозатора обеспечивались с помощью газовой системы 2 и системы дозации 12. Параметры процесса обработки кварцевого концентрата изменялись с помощью единой системы контроля и управления 1. Кварцевые частицы 7 транспортирующим газом подавались в плазменную струю 6, генерируемую плазмотроном, где подвергались высокоинтенсивному импульсному воздействию, и далее этим же потоком транспортировались в сборник продукта 8 с деионизированной водой 9.



**Рис. 1.** Схемы экспериментальных установок для исследования плазменного метода получения особо чистого кварца из промежуточных кварцевых концентратов:

*а* — модернизированная установка Sulzer Metco; *б* — микроплазменная установка: 1 — система контроля и управления; 2 — газовая система; 3 — катод; 4 — система электропитания; 5 — анод; 6 — плазменная струя; 7 — обрабатываемые кварцевые частицы; 8 — сборник продукта; 9 — деионизированная вода; 10 — система охлаждения; 11 — канал инжектора подачи кварцевых частиц; 12 — система дозации

В проведенных экспериментах электрическая мощность  $P_{эл}$  плазменной установки Sulzer Metco варьировалась от 4,5 до 30 кВт при изменении силы тока разряда от 130 до 800 А (напряжение на электродах  $\approx 35...37$  В). При значениях массового расхода плазмообразующего газа (аргон)  $G = 10^{-3}$  кг/с основной энергетический параметр — удельная энергия, подводимая к плазме,  $h = \eta P_{эл}/G$  (или удельная энтальпия плазмы на выходе из плазмотрона, где  $\eta$  — КПД плазмотрона) — изменялся от 3 до 12 МДж/кг, а температура плазмы на выходе из сопла плазмотрона могла изменяться в диапазоне 6 000...12 000 К. Расходы транспортирующего газа и обрабатываемой кварцевой крупки во всех экспериментах поддерживались постоянными и составляли  $10^{-4}$  и  $\approx (2...2,5) \cdot 10^{-4}$  кг/с соответственно. Подача осуществлялась непосредственно за срезом сопла плазмотрона через инжектор в направлении, перпендикулярном оси струи. Продукты переработки собирались в емкость с деионизированной водой, расположенную на расстоянии 400 мм от среза сопла плазменной горелки.

Электрическая мощность микроплазменной установки изменялась в пределах от 0,5 до 3 кВт при изменении силы тока от 15 до 60 А и напряжения на электродах от 34 до 47 В. При значениях массового расхода плазмообразующего газа (аргон)  $8 \cdot 10^{-5}$  кг/с и транспортирующего газа  $2,6 \cdot 10^{-5}$  кг/с температура плазмы на выходе из сопла плазмотрона могла изменяться в диапазоне 6 000...12 000 К, а ее удельная энтальпия — от 3 до 12 МДж/кг. Расход обрабатываемой кварцевой крупки во всех экспериментах принимал значения  $(1,5...2) \cdot 10^{-5}$  кг/с. Продукты переработки собирались в емкость с деионизированной водой, расположенную на расстоянии 260 мм от среза сопла плазменной горелки.

**Методы исследования.** Для плазменного обогащения использована кварцевая крупка дисперсностью 100...400 мкм различных геолого-генетических типов и месторождений России (Средний и Южный Урал). Данный концентрат был получен с помощью многостадийной технологии обогащения, включающей хорошо отработанные физико-химические методы: дробление, истирание, магнитную и электромагнитную сепарации, гравитационное обогащение. При этом для экспериментов по дальнейшему плазменному обогащению отбирались только предварительно обогащенные концентраты кварца с суммарной концентрацией примесей не более 100 ppm.

Методика исследования включала в себя обработку кварцевого концентрата в плазменном потоке при фиксированных значениях массовых расходов плазмообразующего и транспортирующего газов, расхода кварцевой крупки и заданной электрической мощности плазмотрона. Далее проводилась ультразвуковая дезинтеграция частиц продукта с последующим рассеиванием мокрым способом и сушкой.

В исследование исходного сырья и продуктов плазменной переработки входило изучение структур и текстур, химического состава твердофазных структурных и неструктурных примесей, состава газовых и жидких включений и ряда качественных характеристик кварцевого сырья.

Для определения элементного состава неструктурных твердофазных примесей кварцевого концентрата использовался метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), основанный на полном растворении кварца в кислотах и определении примесей (Li, Na, Mg, Al, K, Ca, Mn, Ti, Fe, Cu, Ni, Cr, P, B, Zr) в растворе. Измерения проводились на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Elan 6100 производства фирмы PerkinElmer.

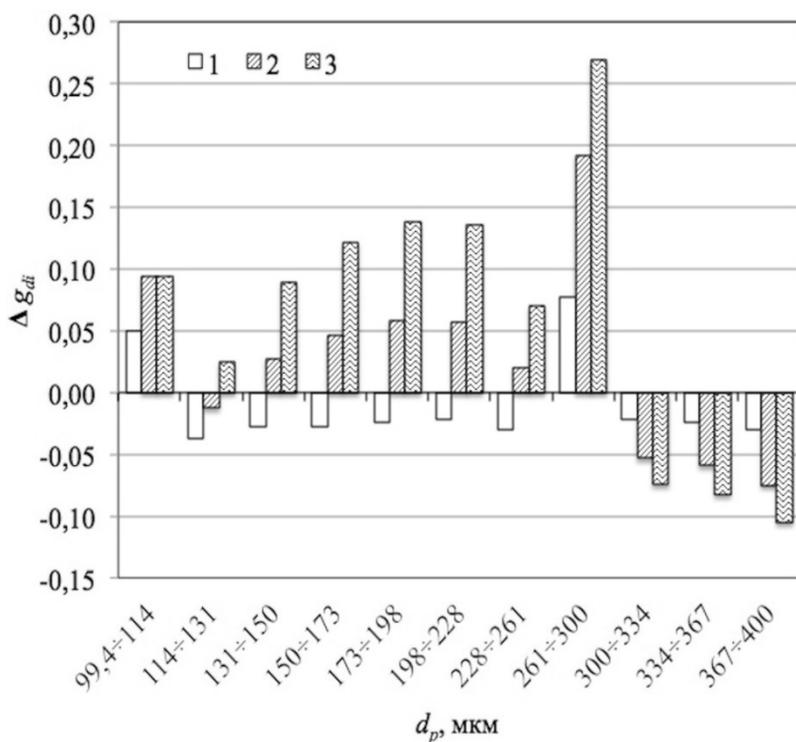
Для изучения содержания флюидных примесей ГЖВ применялся метод кинетической термодесорбционной масс-спектрометрии с количественным анализом потоков веществ [5], выделяющихся в высокий вакуум при нагреве исследуемой крупки от комнатной температуры до 1400 °С в ступенчатом (через 200 °С) режиме нагрева.

Гранулометрический анализ частиц кварцевого концентрата проведен с использованием универсального лазерного анализатора «Микросайзер 201». Данный прибор позволяет определить дисперсный состав порошка, содержащего частицы размерами от 0,2 до 600 мкм.

Электронная микроскопия исходного и переработанного кварцевого концентрата проведена с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа сверхвысокого разрешения Zeiss Ultra plus на базе Ultra 55. Диапазон увеличений: 12×—900 000× в режиме вторичных электронов и 100×—900 000× в режиме обратно рассеянных электронов.

Эффективность обогащения оценивали на основе сравнения гранулометрического состава, содержания неструктурных и структурных примесей, концентраций флюидных примесей ГЖВ, удельной поверхности и коэффициента светопропускания исходной и переработанной в плазменной струе кварцевой крупки.

**Результаты экспериментальных исследований.** Методом лазерной дифрактометрии установлено, что плазменная переработка изменяет гранулометрический состав концентратов кварца. Показано, что плазменная обработка приводит к расколу частиц кварца, смещая максимум распределения частиц по размерам в область меньших размеров, т. е. разрушению подвергаются наиболее крупные частицы. Количественно этот эффект иллюстрируется типичной для большинства исследованных кварцев диаграммой изменения весовой доли  $\Delta g_{di}$  различных фракций концентрата молочно-белого жильного кварца Карановского месторождения после плазменной обработки (рис. 2).



**Рис. 2.** Изменение весовой доли частиц кварца (молочно-белый жильный кварц Карановского месторождения) различного диаметра после плазменной обработки на разных энергопотребительных режимах:

1 —  $h = 5,4$  МДж/кг; 2 —  $h = 8,5$  МДж/кг; 3 —  $h = 11,4$  МДж/кг

Изменение весовой доли рассчитывалось как

$$\Delta g_{di} = (g_{di} - g_{di0}) / g_{di0},$$

где  $g_{di0}$ ,  $g_{di}$  — соответственно доля частиц данной фракции до и после обработки.

Как видно, можно выделить несколько групп частиц, доля которых (после обработки в потоке высокотемпературного аргона) уменьшилась или, наоборот, увеличилась. В частности, можно отметить, что при всех режимах обработки доля крупных частиц (более 300 мкм) всегда уменьшается, причем с увеличением удельного энергозатрата количество разрушаемых частиц растет.

При режимах со значениями удельного энергозатрата в диапазоне 8,5...11,4 МДж/кг наблюдается увеличение количества частиц размерами от 100 до 300 мкм, но при энергозатрате  $h = 5,4$  МДж/кг доля частиц размерами менее 200 мкм уменьшается. Полученные результаты можно объяснить различными траекториями (и, соответственно, различными температурами нагрева), температурами разрушения [6], степенью дефектности и состоянием поверхности отдельных частиц.

Важно обратить внимание на тот факт, что раскол частиц в исследованном диапазоне удельного энергозатрата в плазму  $h$  не приводит к появлению значительного (по массе) количества частиц размерами менее 100 мкм, которые считаются непригодными для плавки, т. е. выход продукта при плазменном методе обогащения по этому параметру близок к 100 %.

Между тем помимо раскола кварцевых частиц наблюдается образование большого количества частиц размерами от десятых долей до нескольких микрон (рис. 3). На основании данных электронной микроскопии показано, что, по крайней мере, некоторые из них являются микрочастицами примесей, осажденными на поверхности обработанного кварцевого концентрата.

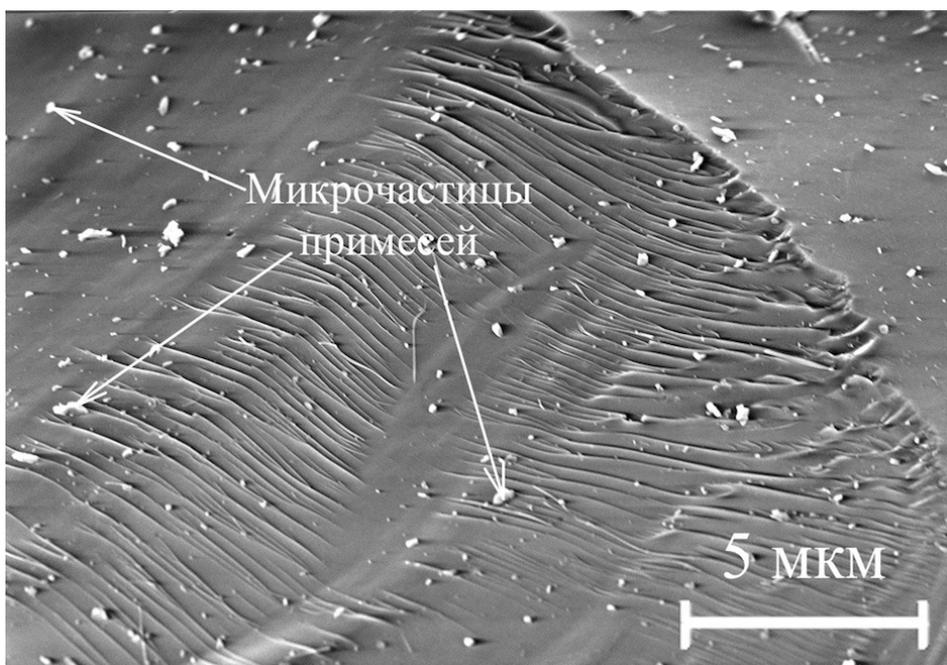
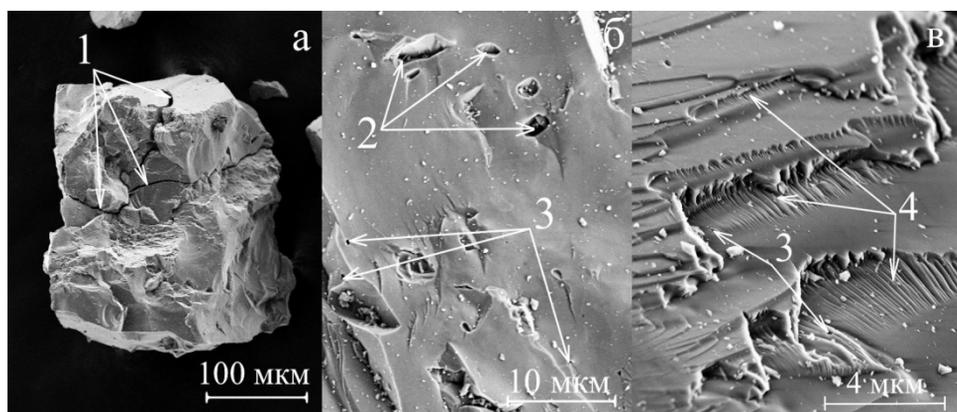


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение микрочастиц элементов примесей на поверхности обработанного кварцевого концентрата

Электронно-микроскопическое исследование кварцевых концентратов, прошедших плазменную обработку, подтвердило наличие термобарического растрескивания частиц крупки (рис. 4, а) при воздействии высокотемпературного потока. Установлено, что очагами такого разрушения являются исходные поверхностные трещины и микротрещины, блочные границы, скопление линейных дислокаций и другие концентраторы напряжений. Наблюдаются множественные следы от высвободившихся крупных пластинчатых и мелких твердофазных включений, а также вскрытые вакуоли ГЖВ (рис. 4, б и в).



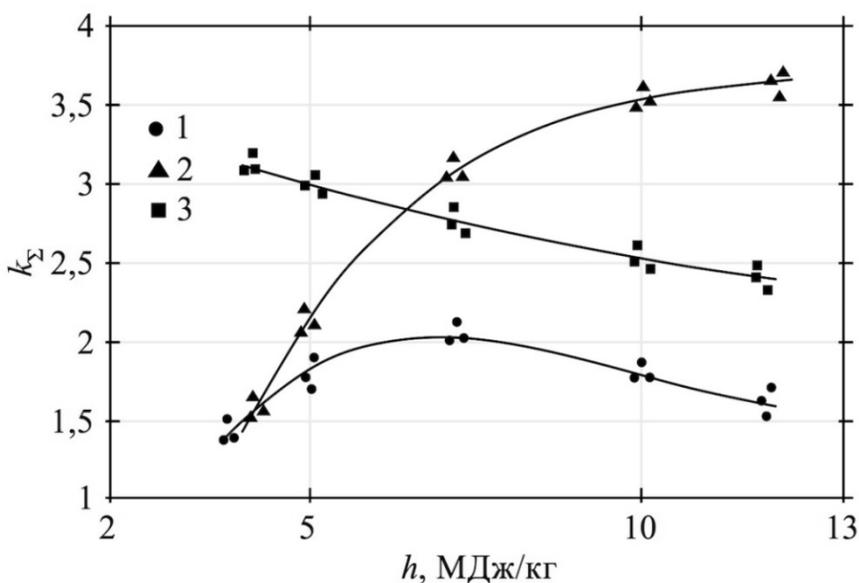
**Рис. 4.** Электронно-микроскопические изображения молочно-белого жильного кварца (Карановское месторождение) после плазменной обработки при  $h = 8,5$  МДж/кг:

1 — трещины; 2 — следы высвободившихся твердых примесей; 3 — следы вскрытых ГЖВ; 4 — ямки плазменного травления

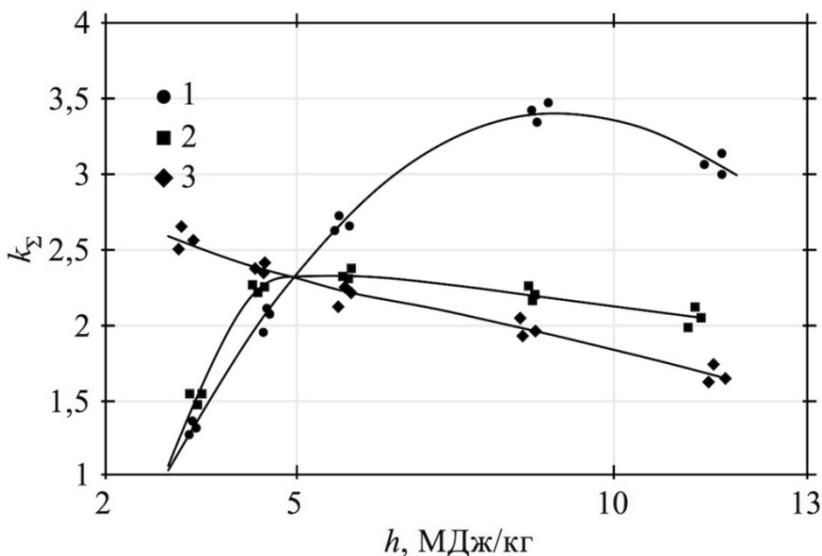
Обнаружено, что в процессе плазменной обработки на поверхности частиц (см. рис. 4, в) образуются ямки травления и распространяющиеся от них вглубь каналы травления. Наблюдается сетка дефект-каналов, аналогичная сетке дефект-каналов после искусственного травления кварца в плавиковой кислоте (или после высокотемпературного хлорирования).

Об эффективности удаления неструктурных твердофазных элементов примесей из исходного кварцевого концентрата судили по значениям индивидуальных  $k_i = K_{i0}/K_i$  и общего  $k_\Sigma = \sum k_i$  коэффициентов обогащения, где  $K_{i0}$  и  $K_i$  — концентрации элементов до и после плазменной обработки, определенные с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой.

На рис. 5 и 6 представлены экспериментальные зависимости  $k_\Sigma$  от  $h$ , полученные при плазменной переработке кварцевых концентратов различных месторождений на установке Sulzer Metco и на микроплазматроне соответственно. Полученные результаты позволяют сделать важный вывод о наличии порогового значения удельной энthalпии плазменной струи  $h_{\text{пор}}$  (а следовательно, порогового значения удельной электрической мощности плазматрона  $P_{\text{эл.пор}}$ ), при превышении которого наблюдается эффект плазменного обогащения кварцевого концентрата, т. е. общий коэффициент обогащения  $k_\Sigma$  становится больше единицы. Для большинства исследованных кварцев значения  $h_{\text{пор}}$  лежат в диапазоне 1...3 МДж/кг.



**Рис. 5.** Зависимости общего коэффициента обогащения  $k_{\Sigma}$  от удельной энтальпии плазмы  $h$ , полученная на установке Sulzer Metco  
 1 — гранулированный кварц (Придорожное месторождение); 2 — гранулированный кварц (Таштыбутакское жильное поле); 3 — гранулированный кварц (Черкасинское проявление)



**Рис. 6.** Зависимости общего коэффициента обогащения  $k_{\Sigma}$  от удельной энтальпии плазмы  $h$ , полученные на микроплазменной установке:  
 1 — прозрачный жильный кварц (Чулбонское месторождение); 2 — прозрачный жильный кварц (Кузнечихинское месторождение); 3 — молочно-белый жильный кварц (Карановское месторождение)

Для кварцевых концентратов различных месторождений установлены оптимальные значения основного энергетического параметра обработки  $h_{\text{опт}}$ , при которых  $k_{\Sigma}$  максимальны. Например,  $h_{\text{опт}}$  для прозрачного жильного кварца Чулбонского (1 на рис. 6) и Кузнечихинского (2 на рис. 6) месторождений, а также для гранулированного кварца Придорожного месторождения (1 на рис. 5) имеют значения 5...9 МДж/кг. Для молочно-белого жильного кварца Карановского месторождения (3 на рис. 6) и гранулированного кварца Черкасинского проявления (3 на рис. 5) увеличение электрической мощности плазмотрона при постоянном расходе газа и кварцевой крупки приводит к снижению коэффициента  $k_{\Sigma}$ , а для гранулированного кварца Таштыбутакского жильного поля (2 на рис. 5) — к устойчивому росту. Отсутствие экстремумов в исследованном интервале свидетельствует о том, что для кварца Таштыбутакского жильного поля  $h_{\text{опт}} > 12$  МДж/кг, для кварцев Черкасинского проявления и Карановского месторождения  $h_{\text{опт}} < 3$  МДж/кг. Существенное различие в оптимальных значениях удельного энергозатрата объясняется различием элементного состава и содержания ГЖВ, находящихся в вакуолях кварцев разных геолого-генетических типов и месторождений, а также структурно-текстурными особенностями их строения (внутреннее строение, имеющиеся дефекты).

Установлено, что рабочий диапазон содержания примесей в исходном кварцевом концентрате для последующего плазменного обогащения должен составлять не более 70...80 ppm. Показано, что при плазменной обработке кварцевых концентратов с такой концентрацией примесей общий коэффициент плазменного обогащения находится в диапазоне  $k_{\Sigma} = 1,5...4,0$ , а индивидуальные коэффициенты обогащения по отдельным элементам-примесям могут достигать значений  $k_i = 5...10$ .

Некоторые из результатов экспериментального исследования содержания примесей и индивидуальных коэффициентов обогащения концентратов кварца, прошедших плазменную обработку на установке Sulzer Metco при удельном энергозатрате  $h \approx 8...9$  МДж/кг, представлены в таблице.

Как видно, наиболее эффективно удаляются натрий, железо и титан: их коэффициенты обогащения могут достигать значений 3...6 и выше. Также обладают высокой эффективностью удаления марганец, кальций, калий и магний, их коэффициенты обогащения лежат в диапазоне  $k_i \approx 2...3$ . Следует обратить внимание на высокий уровень коэффициентов обогащения (1,2...2) таких трудноудаляемых традиционными методами элементов, как алюминий и литий. Установлено, что индивидуальные и общие коэффициенты обогащения при обработке плазменным методом достигают больших значений, чем при использовании традиционных методов глубокого обогащения (например, высокотемпературного хлорирования).

## Содержание примесей $K_i$ и коэффициенты обогащения $k_i$ концентратов кварца, прошедших плазменную обработку

Примесь	Агордяшское месторождение		Вязовское месторождение		Таштыбутакское проявление				Черкасинское проявление	
	$K_i$ , ppm	$k_i$	$K_i$ , ppm	$k_i$	жила № 7		жила № 1704		$K_i$ , ppm	$k_i$
					$K_i$ , ppm	$k_i$	$K_i$ , ppm	$k_i$		
Li	0,74	1,23	1,30	0,84	0,85	0,98	0,17	1,23	0,06	1,69
Mg	0,17	3,88	0,25	7,96	0,50	1,00	0,50	1,10	0,61	2,16
Al	13,75	4,22	12,79	1,84	12,30	0,89	4,80	1,21	8,47	1,41
K	0,63	26,54	0,73	2,56	2,05	0,80	0,87	2,45	1,03	2,60
Ca	0,18	0,06	0,21	0,05	1,00	1,00	1,24	2,72	2,24	2,81
Mn	0,03	1,67	0,02	0,50	0,19	3,32	0,18	2,89	0,38	1,87
Ti	4,29	1,15	2,29	0,79	2,27	0,85	0,26	4,50	0,50	4,78
Fe	0,66	7,02	0,47	3,83	5,34	9,22	4,51	6,63	3,80	5,92
Cu	0,01	1,00	0,01	1,00	0,46	0,15	0,60	0,08	0,63	0,08
Na	0,38	3,37	0,50	15,84	1,00	2,92	1,00	7,64	1,38	7,29
Сумма	20,84	4,19	18,57	2,16	25,96	2,68	14,13	3,63	19,10	3,04

Экспериментально обнаружено уменьшение содержания ГЖВ в пробах, прошедших плазменную обработку. Выявлено, что высокая эффективность удаления ГЖВ наблюдалась при обработке кварца в плазменной струе с удельным энерговыделением  $h > 10$  МДж/кг. Это объясняется тем, что элементный состав ГЖВ большинства исходных кварцевых концентратов характеризуется малой объемной долей жидких примесей. Установлено, что плазменная обработка позволяет снизить концентрации флюидных примесей до значений, не превышающих критической величины. Если концентрация примесей больше критической, то в наплавленном из такого сырья кварцевом стекле могут появляться различные дефекты. Обнаружено, что после переработки коэффициент светопропускания в полученном кварце возрастает до 90...95 %, что также говорит об уменьшении содержания минеральных примесей и ГЖВ.

Для разделения переработанного кварцевого концентрата и микрочастиц примесей, а также для его дальнейшего обогащения использована ультразвуковая дезинтеграция. Обработка переработанного кварцевого концентрата проводилась на ультразвуковом диспергаторе типа УЗДН-А. Далее частицы двух фракций (обработанный кварцевый концентрат и микрочастицы примесей) подвергали рассеиванию на ситах мокрым способом с выделением продукта с размерами частиц более 100 мкм. На заключительном этапе полученный порошок высушивали. Об эффективности диспергирования судили по величине удельной поверхности кварцевой крупки до и после обработки. Показано, что ультразвуковая обработка приводит к уменьшению удельной поверхности кварцевого концентрата, что свидетельствует об удалении микрочастиц с его поверхности и о дополнительном обогащении крупки. Установлено, что более эффективным является ультразвуковое диспергирование с мощностью излучения 100 Вт.

**Заключение.** Полученные экспериментальные данные доказывают, что на электродуговых плазматронах мощностью от 3 до 50 кВт можно эффективно проводить финишный этап технологии обогащения различных типов промежуточных кварцевых концентратов с получением ОЧК, соответствующего сортам Iota-STD.

Установлено пороговое значение удельной энтальпии плазменной струи  $h_{\text{пор}}$  (1...3 МДж/кг), при превышении которого наблюдается эффект плазменного обогащения кварцевого концентрата.

Выявлено, что рабочий диапазон содержания примесей в исходном кварцевом концентрате для последующего плазменного обогащения должен составлять не более 70...80 ppm. Показано, что при плазменной обработке кварцевых концентратов с такой концентрацией примесей общий коэффициент плазменного обогащения  $k_{\Sigma} = 1,5...4,0$ .

Доказано, что плазменная обработка приводит к расколу частиц кварца, смещая максимум распределения частиц по размерам в область 200...300 мкм. Показано, что раскол частиц при значениях удельного энерговклада в плазму менее 10 МДж/кг не приводит к появлению значительного (по массе) количества частиц размерами менее 100 мкм.

Обнаружено, что в процессе плазменной обработки имеет место явление термобарического растрескивания частиц крупки, а на поверхности частиц образуются ямки травления и распространяющиеся от них вглубь каналы травления.

Высокая эффективность удаления ГЖВ наблюдалась при обработке кварца в плазменной струе с удельным энерговкладом  $h > 10$  МДж/кг.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Серых Н.М., Борисов Л.А., Федотов В.К. Минерально-сырьевая база пьезооптического и кварцевого сырья России. *Горный журнал*, 2009, № 6, с. 34–37.
- [2] Гришин Ю.М., Козлов Н.П., Кулагин А.Ю., Скрыбин А.С., Борисов Л.А., Серых Н.М., Магомедов К.К. *Способ получения особо чистого кварцевого концентрата из природного кварца*. Пат. № 2434683 Российская Федерация, 2011, бюл. № 33, с. 11.
- [3] Борисов Л.А., Гришин Ю.М., Гулин Е.Н., Кайряк А.Д., Козлов Н.П., Кутырев М.Д. Исследования модификации состава примесей частиц природного кварца в дисперсионном плазменном потоке. *ТВТ*, 2007, т. 45, № 5, с. 777–781.
- [4] Гришин Ю.М., Борисов Л.А., Козлов Н.П., Кулагин А.Ю., Скрыбин А.С. Плазменный метод в технологии производства особо чистого кварцевого концентрата. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, спец. вып. «Ионно-плазменные технологии», с. 79–88.
- [5] Крейсберг В.А. Некоторые особенности вскрытия и анализа газово-жидких примесей в кварце. *Разведка и охрана недр*, 1999, № 6, с. 21–27.
- [6] Гришин Ю.М., Козлов Н.П., Кулагин А.Ю. Теоретическое исследование процессов взаимодействия частиц природного кварца с потоком низкотемпературной электродуговой плазмы. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2011, № 6–3, с. 73–81.

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гришин Ю.М., Козлов Н.П., Кулагин А.Ю. Экспериментальное исследование финишного этапа обогащения кварца в плазменных потоках. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1027.html>

**Гришин Юрий Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика и техника низкотемпературной плазмы, высокотемпературная теплофизика. e-mail: [ygrishin@power.bmstu.ru](mailto:ygrishin@power.bmstu.ru)

**Козлов Николай Павлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика и техника низкотемпературной плазмы, высокотемпературная теплофизика. e-mail: kozlov1929@mail.ru

**Кулагин Алексей Юрьевич** — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: физика и техника низкотемпературной плазмы, высокотемпературная теплофизика. e-mail: aykulagin@me.com