



«Плазменные технологии в производстве стекла»

*Академик РАН, д.т.н., профессор
Бессмертный В.С.*

Преимущества плазменных технологий

- 1- энергосбережение;
- 2- высокая производительность технологических процессов;
- 3- экологическая безопасность;
- 4- регулирование окислительно-восстановительных условий плазменного факела;
- 5- интенсификация процессов силикатообразования, накопление силикатного расплава и его гомогенизация

Возможность использования плазменного факела в технологии стекла

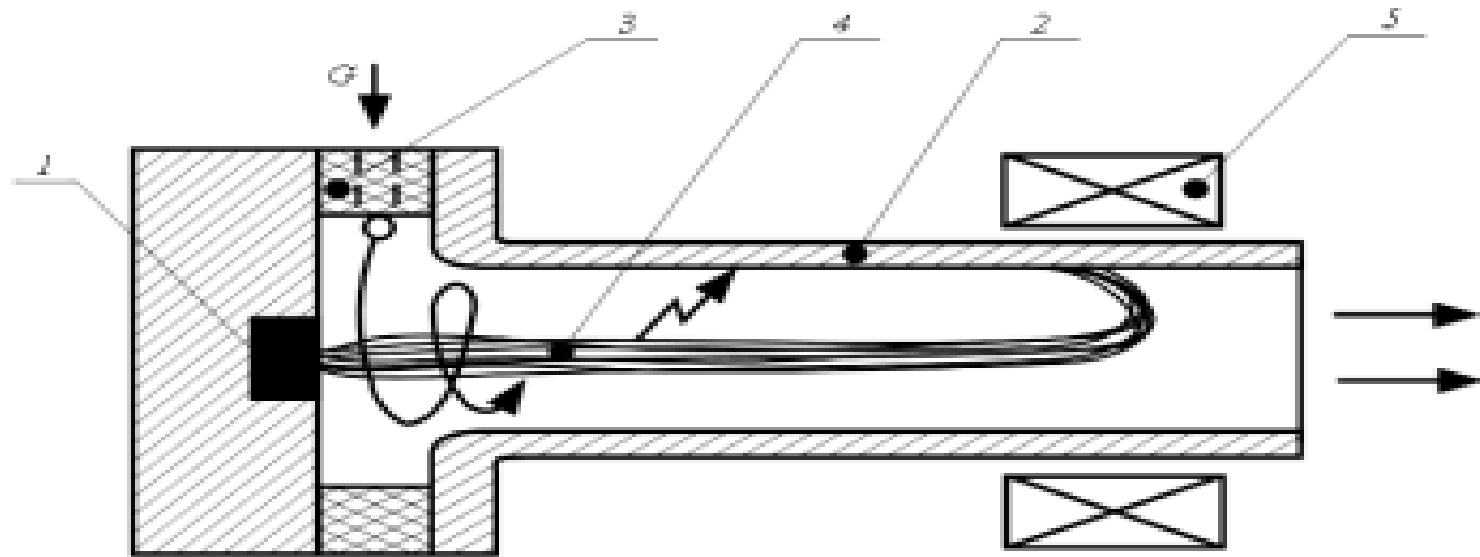
- 1 – синтез тугоплавких стекол с t плавления, превышавшей 2000С;
- 2- получение стеклянных микрошариков и полых стеклянных микросфер;
- 3- получение стекловолокна и волоконной оптики;
- 4- синтез стекол из паровой фазы;
- 5- синтез стеклокристаллических материалов;
- 6- декорирование сортовой посуды;
- 7- матирование стеклоизделий;
- 8- металлизация стеклоизделий

Возможность использования плазменного факела в технологии стекла

- 9- термическая полировка стеклоизделий;
- 10- отрезка колпачка (при производстве сортовой посуды);
- 11- резка стекол ;
- 12- глазурование керамических изделий;
- 13- синтез силикат-глыбы для производства жидкого стекла;
- 14- синтез гранулированного блочного пеностекла;
- 15- глазурование силикатного кирпича;
- 16- глазурование бетона и других композиционных материалов и т.д.

Виды плазмотронов

Схема плазмотрона с самоустанавливающейся
длиной дуги

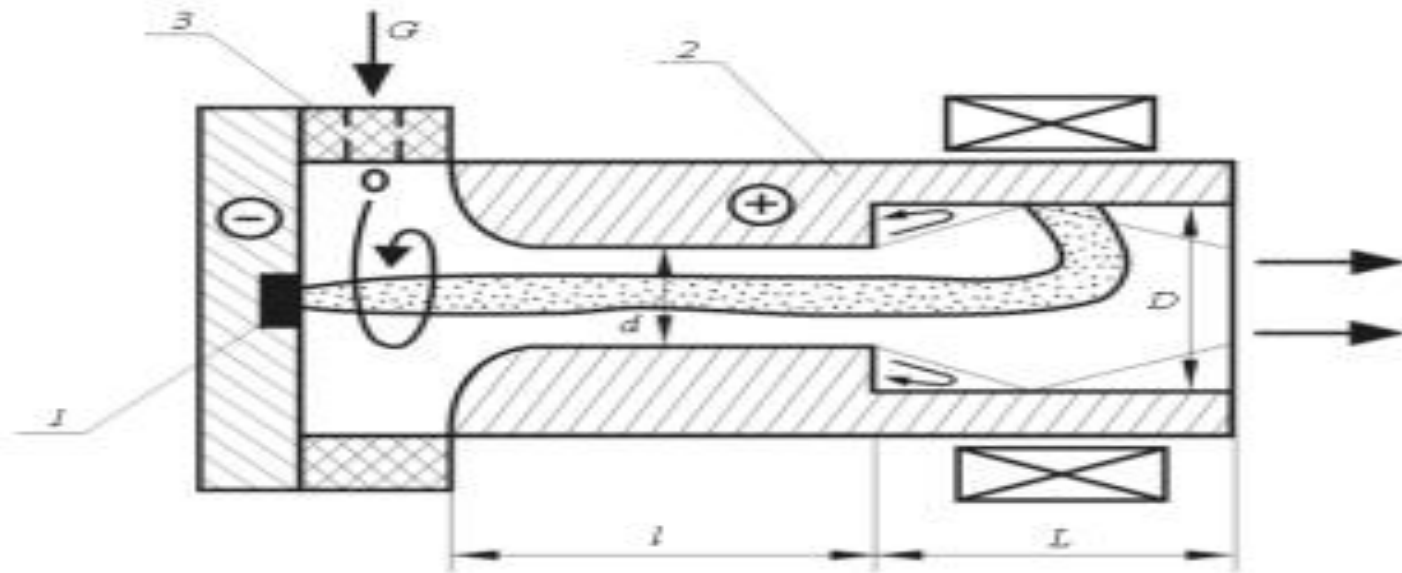


1-торцевой катод, 2- анод,

3- кольцо закрутки, 4- электрическая дуга, 5- соленоид

Виды плазмотронов

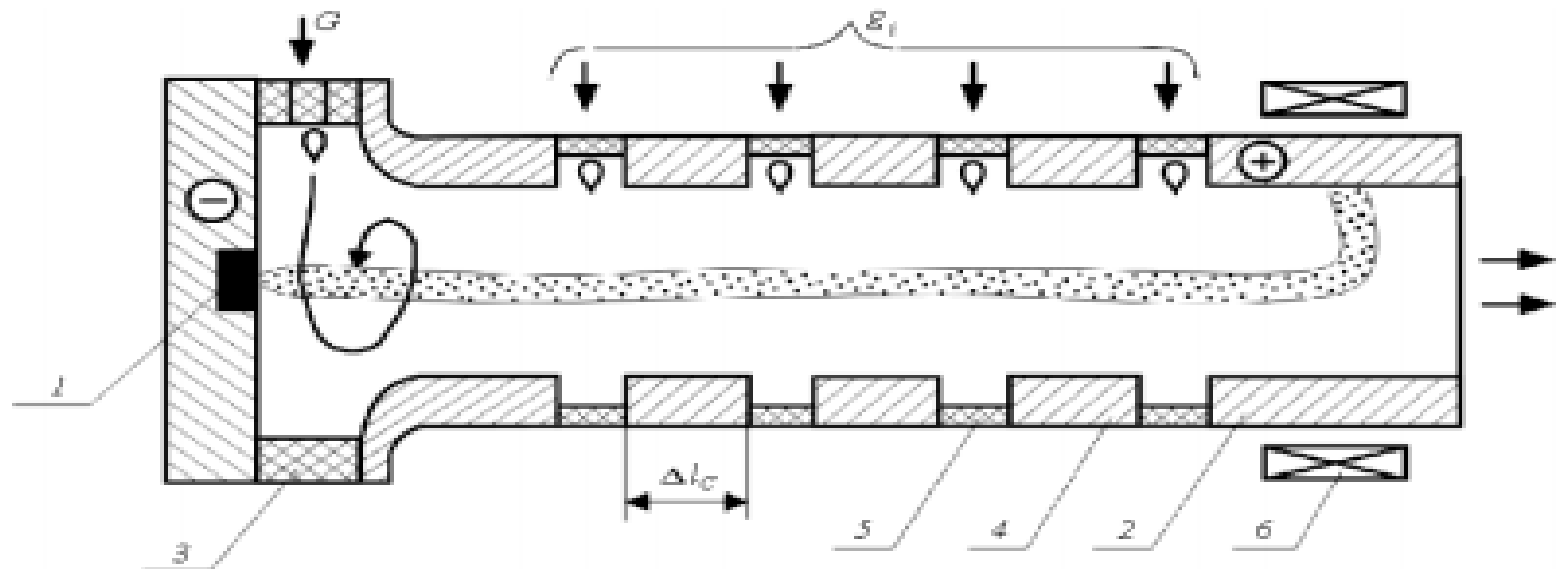
Схема плазмотрона с фиксацией средней
длины дуги уступом



- 1 – внутренний электрод-катод;
- 2 – выходной электрод-анод ступенчатой геометрии;
- 3 – вихревая камера

Виды плазмотронов

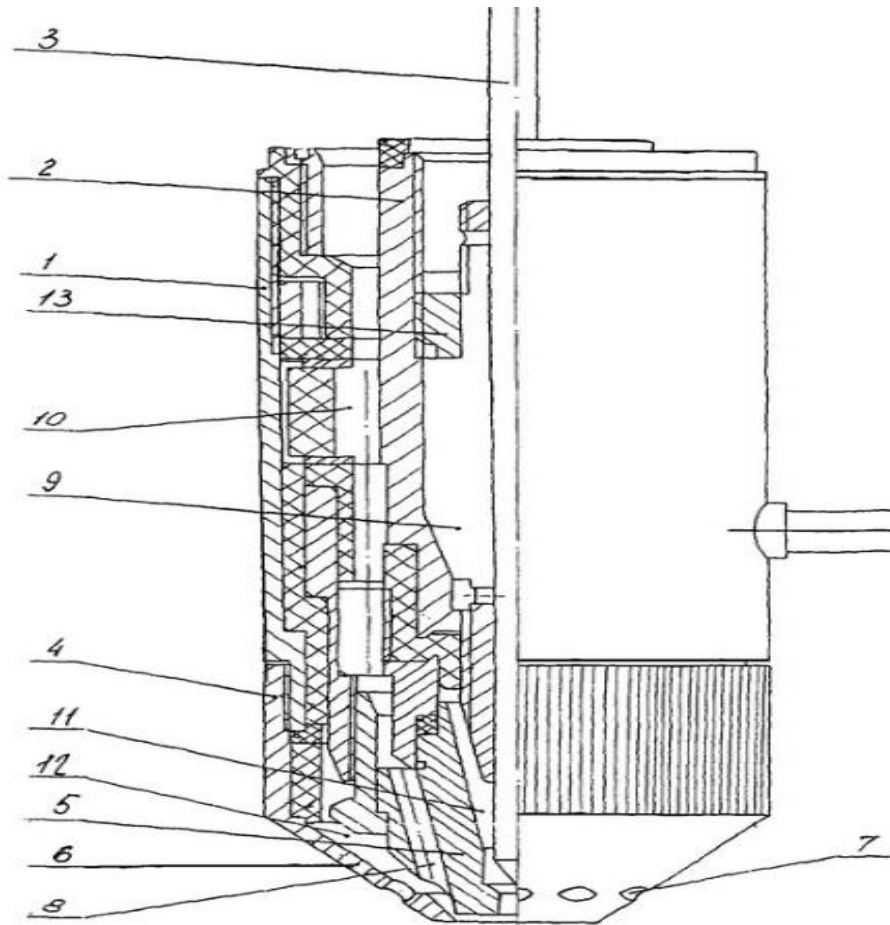
Схема плазмотрона с секционированной МЭВ



1 – катод; 2 – анод; 3 – подача основного расхода газа G ;
4 – секция МЭВ; 5 – узел подачи межсекционного расхода газа g_i ;
6 – соленоид.

Виды плазмотронов

Электродуговой плазмотрон



1-корпус

2- электродержатель

3- стержневой катод

4- наружное сопло

5-внутреннее сопло

6- нижняя часть

7-отверстие

8- каналы

9- полость для подачи
плазмообразующего газа

10- полость для подачи защитного газа

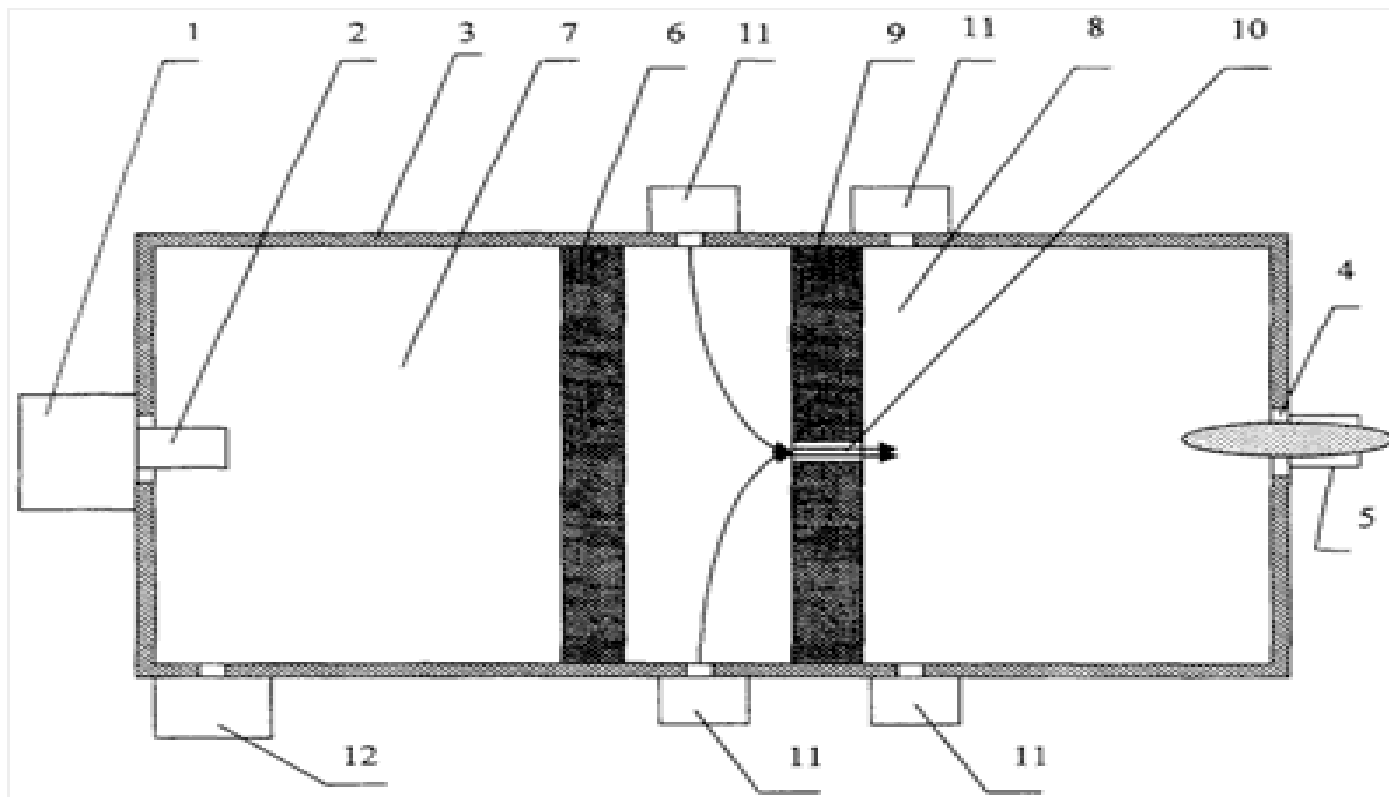
11-зазор для прохождения
плазмообразующего газа

12- зазор для прохождения защитного
газа

13-зажимная цанга.

Виды плазмотронов

СВЧ-плазмотрон



1-магнетрон, 2- антенна,3-резонатор, 4- выводное отверстие,5- сопло, 6- перегородка, 7- вводная камера, 8- выводная камера, 9-перегородка, 10- отверстие, 11-средства подачи плазмообразующего газа, 12-средства закачки электроизолирующего газа

Синтез силикат-глыбы

Технические характеристики плазменных горелок

Показатели	ГН-5М	ГН-5Р
1	2	3
Потребляемая мощность, кВт	20	35
Максимальный ток, А	500	800
Плазмообразующий газ	аргон	аргон.гелий, азот, их смеси
Расход плазмообразующего газа, м ³ /час	1-2	2-3
Расход воды на охлаждение, л/мин	10	10

Сырьевые материалы

- кварцевый песок марки Б-100-1 по ГОСТ 22551-77;
- сода кальцинированная марки Б по ГОСТ 5100-85;
- поташ первого сорта по ГОСТ 10690-73.

Виды силикат-глыбы, регламентируемые нормативными документами

Наименование глыбы	силикатный модуль	Содержание щелочей, %
Натриевая	2,7-3,0	25,3-27,9
Калиево-натриевая 75/25	2,85-3,25	28,5-33,2
Натриево-калиевая 70/30	2,75-3,1	25,9-29,9
Калиевая	2,65-2,85	28,1-34,4

Расчетные составы силикат- глыбы

	Содержание компонентов, масс. %		
	Na_2O	K_2O	SiO_2
1	26	-	74
2	8	24	68
3	19	8	73
4	-	31	69

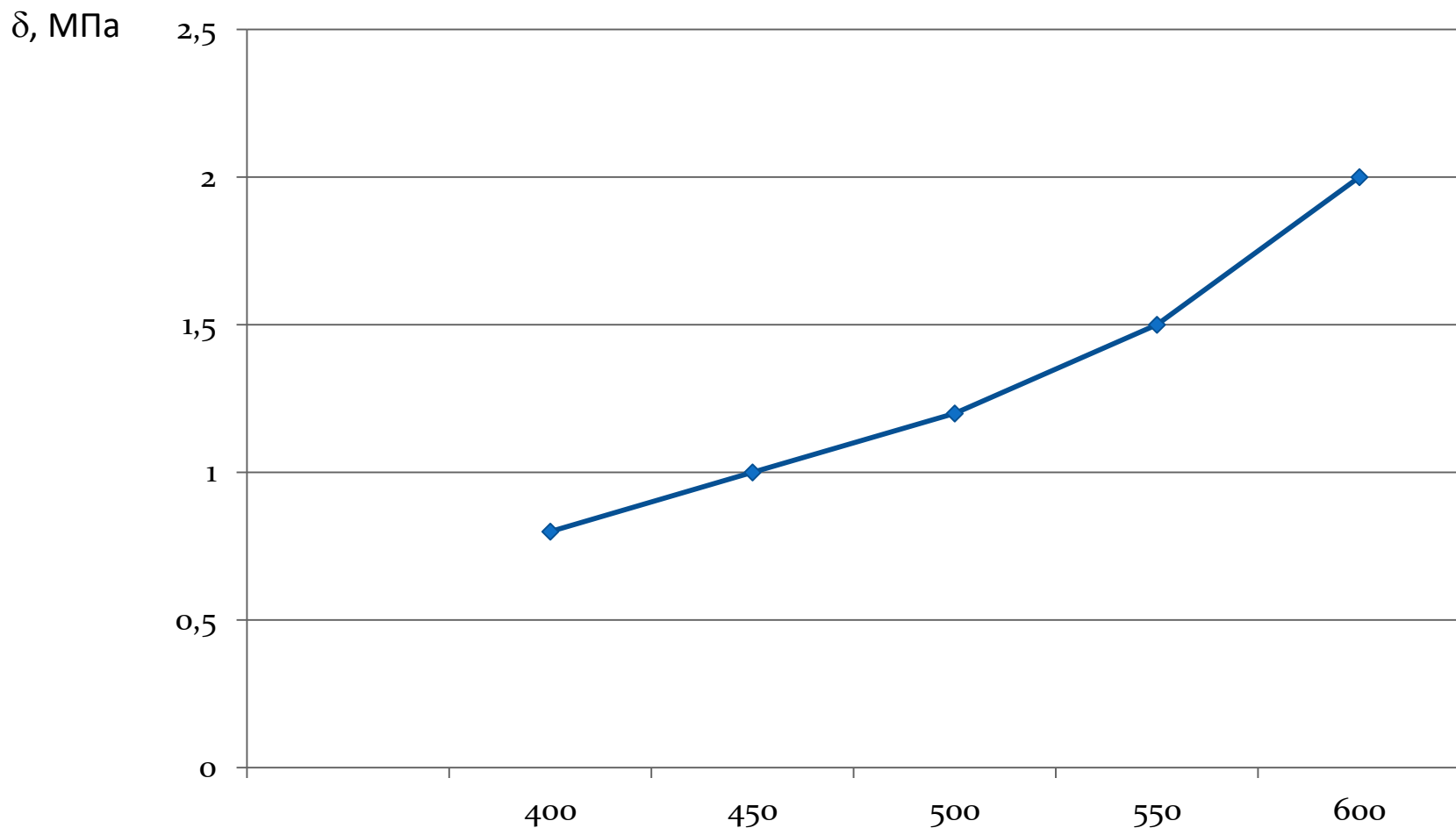
Подготовка исходных шихт для получения силикат-глыбы



Отпрессованные таблетки исследуемых шихт, четырех составов: натриевых, натриево-калиевых, калиево-натриевых, калиевых.

1-первая партия, 2-вторая партия, 3- третья партия, 4- четвертая партия.

Влияние температуры термообработки отходящими плазмообразующими газами на прочность гранулированной шихты



Режимы работы плазмотрона

№	Сила тока, А	Напряжение, В	Расход аргона, м³/час	Давление газа, МПа	Температу ра, К
1	200	30-32	1,8	0,25	2940
2	250				4235
3	300				5869
4	350				7490
5	400				8650
6	450				10780
7	500				1140
8	550				13542
9	600				14688

Среднемассовая температура факела плазмы на срезе сопла, рассчитанная по уравнению Сага

$$T = \frac{J[U - (U_k + U_a)]}{\pi d_c a_c l_a} * \left(1 - e^{-\frac{\pi d_c a_c l_a}{c_p \gamma}}\right),$$

Где J- сила тока дуги, А;

U- напряжение дуги, В;

$U_k + U_a$ – сумма катодного падения напряжения вольфрама и анодного падения напряжения меди в аргоне, $U_k + U_a = 10\text{В}$

α_c – коэффициент теплообмена между газом и каналом сопла, $\alpha_c = 8,38 * 10^2$ Вт/м²*К;

c_p – удельная теплоемкость газа (аргона) в интервале температур 273-10000К;
 $= 5,2 * 10^2$ Дж/кг*К;

γ – расход аргона, равный 1,8 м³/час;

l_a – длина дуги, м;

d_c – диаметр канала сопла, м.

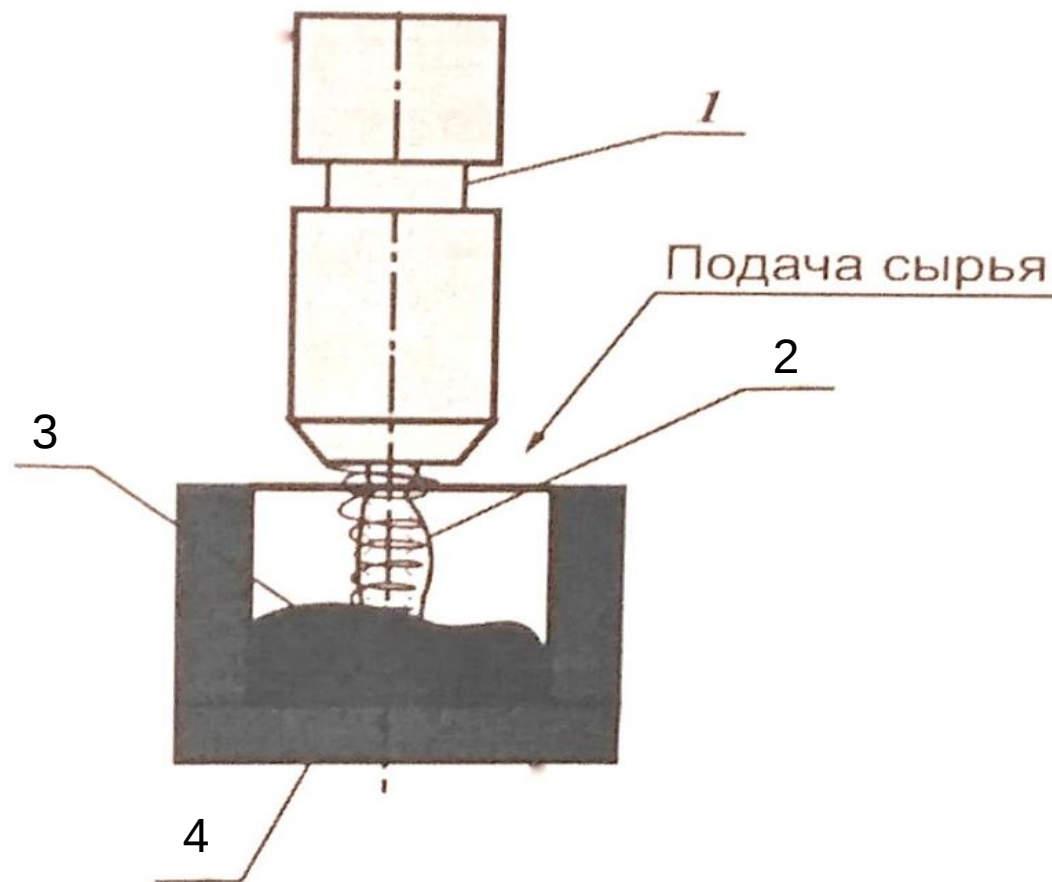
Оптимальные параметры работы плазмотрона

- сила тока 400А;
- напряжение 30-32В;
- расход плазмообразующего газа 1,8м³/час;

**Рассчитанная среднемассовая
температура плазменного факела:**

$$T = \frac{400 \cdot (30 - 10)}{3,14 \cdot 0,005 \cdot 8,38 \cdot 100 \cdot 0,014} \cdot \left(1 - e^{-\frac{3,14 \cdot 0,005 \cdot 8,38 \cdot 100 \cdot 0,014}{5,2 \cdot 100 \cdot 0,0016}}\right) = 8650\text{K}$$

Синтез силикат-глыбы



1. Плазменная горелка, 2- плазменный факел,
3- силикатный расплав, 4-корпус тигля

Синтезированная силикат-глыба



Силика-глыба с 26%Na₂O



Силика-глыба с 8% Na₂O и 24% K₂O



Силика-глыба с 19% Na₂O и 8% K₂O



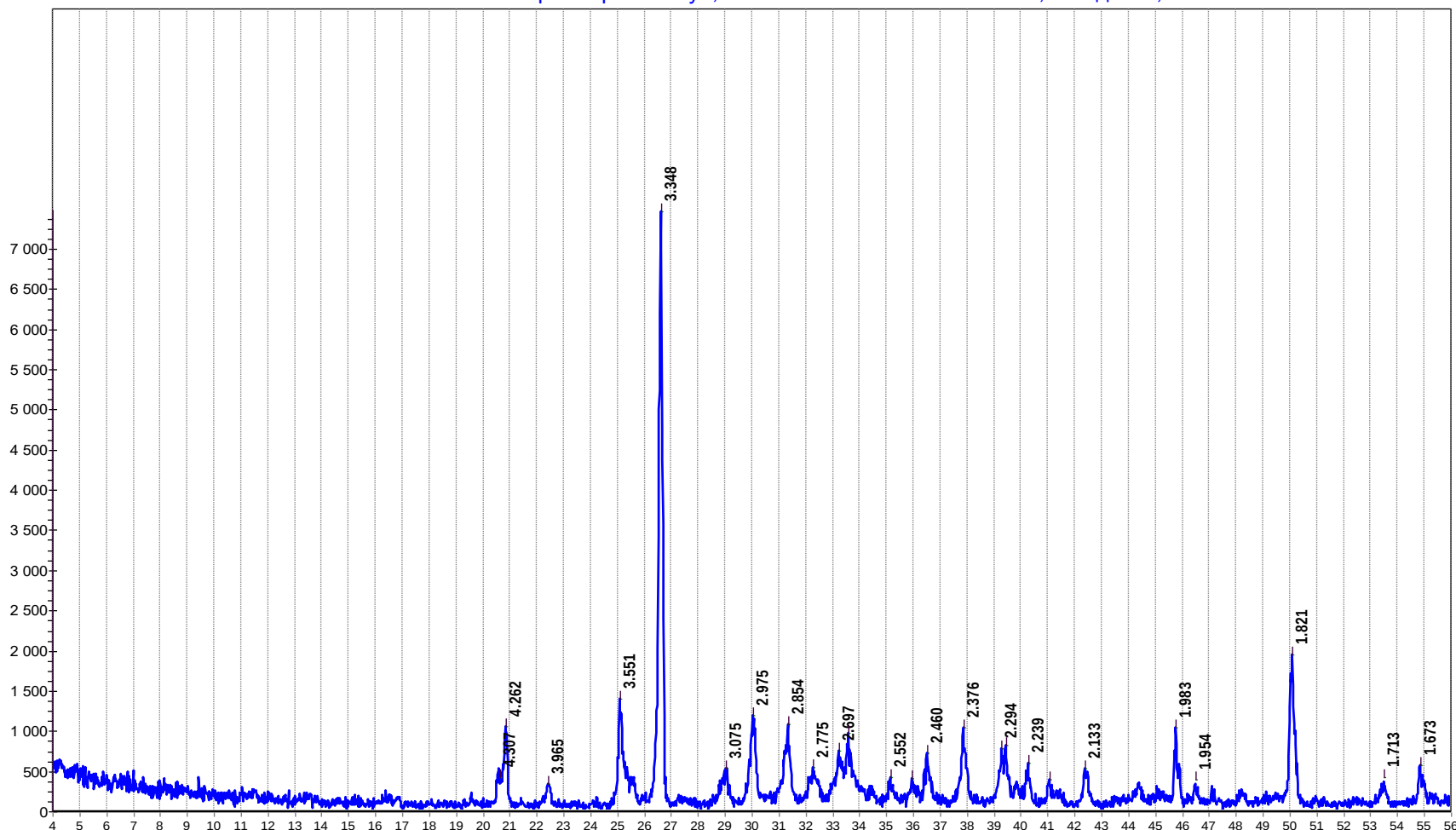
Силика-глыба с 31% K₂O

Химический состав силикат-глыбы

	$\text{Na}_2\text{O}, \%$	$\text{K}_2\text{O}, \%$	$\text{SiO}_2, \%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3, \%$	$\text{Al}_2\text{O}_3, \%$	$\text{MgO}, \%$
1	27,05	-	71,9	0,0454	0,863	0,146
2	9,0	24,7	65,3	0,0701	0,79	0,129
3	20,2	8,7	70,02	0,062	0,84	0,155
4	-	31,23	67,8	0,0409	0,81	0,121

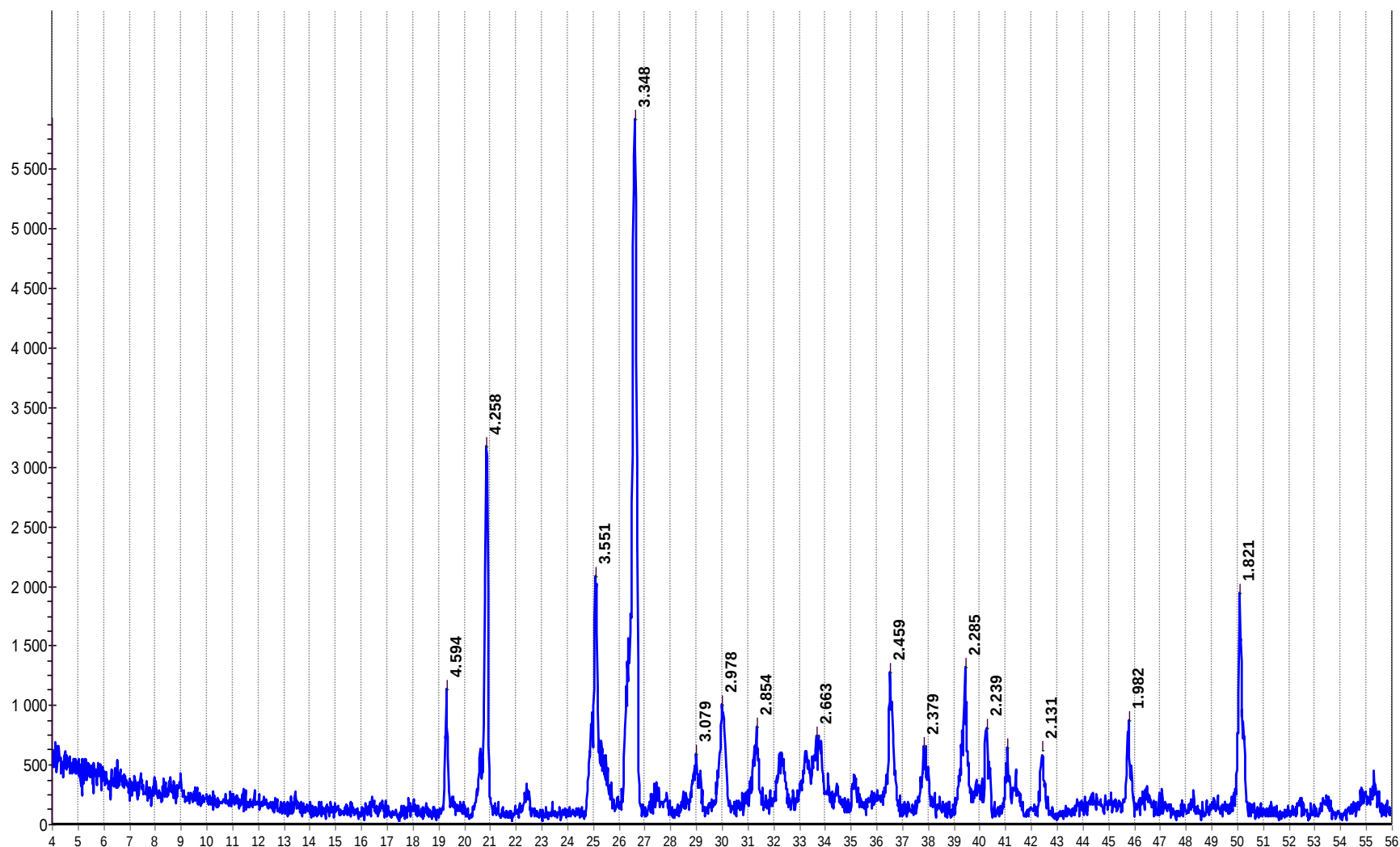
Порошковая рентгеновская дифрактограмма натриевой шихты при 400°C

Файл - 170523132544 натрий карб 400.худ; Съемка - 29.05.2017 11:03:22; Анод - Си;



Нач.угол = 4; Кон.угол = 56; Шаг = 0.02; Экспоз. = 1; Скорость = скорость_1; Макс.число имп. = 7470;
Спиков = 4057; Собщая = 12453; K = 32.6%

Порошковая рентгеновская дифрактограммнатриевой шихты при 500°C



Для расчета скорости испарения диоксида кремния использовали уравнение Герца-Ленгмюра:

$$J_{i\max} = (2\pi M_i RT)^{1/2} \cdot p_i$$

где $J_{i\max}$ - максимальный поток i -го компонента, покидающего поверхность реагирующего вещества, моль/(см²·с);

M_i - молекулярная масса i -го компонента;

R - универсальная газовая постоянная, выраженная в см³·атм/(К·моль);

p_i - парциальное равновесное давление i -го компонента над поверхностью вещества, атм.

**Парциальное давление паров $p(\text{SiO})$
мономолекулярного кислорода $p(\text{O}_2)$ и
суммарное давление паров $p(\text{SiO}_2)$ над
диоксидом кремния:**

- $\lg p(\text{SiO}) = -27505/T + 8,71$
- $\lg p(\text{O}_2) = -27809/T + 8,29$
- $\lg \Sigma p(\text{SiO}_2) = -27597/T + 8,99$

Парциальное давление монооксида кремния $p(\text{SiO})$

$$p(\text{SiO}) = \exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) \cdot (p(\text{O}_2))^{1/2}$$

где ΔG° —стандартное изменение энергии Гиббса реакции инконгруэнтного испарения.

Скорость испарения монооксида кремния, молекулярного кислорода и диоксида кремния

- Применяемая формула:

$$J(\text{SiO}_2) = [1596 \cdot 10^5 / T^{1/2}] \cdot M(\text{SiO}_2) \cdot \left(\exp\left(-\frac{\Delta G^\circ}{RT}\right) / M(\text{SiO}) \right)^{1/2} \cdot (10 \cdot p(\text{O}_2))^{1/2}$$

где $J(\text{SiO}_2)$ – минимальный поток SiO_2 , выраженный через массу оксида кремния, г/(см²·ч);

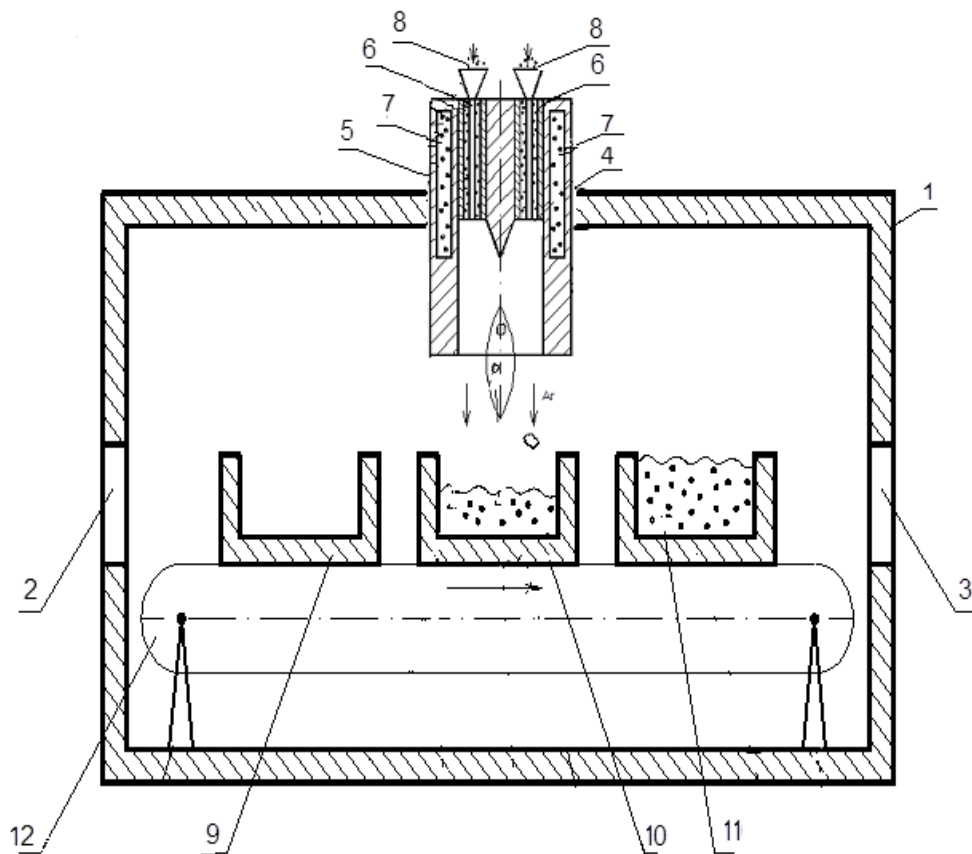
$M(\text{SiO}_2)$ и $M(\text{SiO})$ – молекулярные массы оксидов;

$p(\text{O}_2)$ – парциальное давление кислорода, МПа.

Давление паров и скорости испарения монооксида кремния, молекулярного кислорода и диоксида кремния

№ п/п	Показатель	Значение показателей при температурах			
		1600	1800	1900	2000
1	Давление пара, 10^{-3} , Па	83,42	197,3	201,3	237,8
	$\Sigma p(\text{SiO}_2)$	57,13	175,8	184,3	208,3
	$p(\text{SiO})$	1,48	29,4	30,1	36,8
3	$p(\text{O}_2)$				
4	Скорость испарения J кг/(м ² ·с) J(SiO ₂) при p(O ₂) н.у	$420,78 \cdot 10^{-10}$	$568,37 \cdot 10^{-10}$	$781,73 \cdot 10^{-10}$	$830,01 \cdot 10^{-10}$

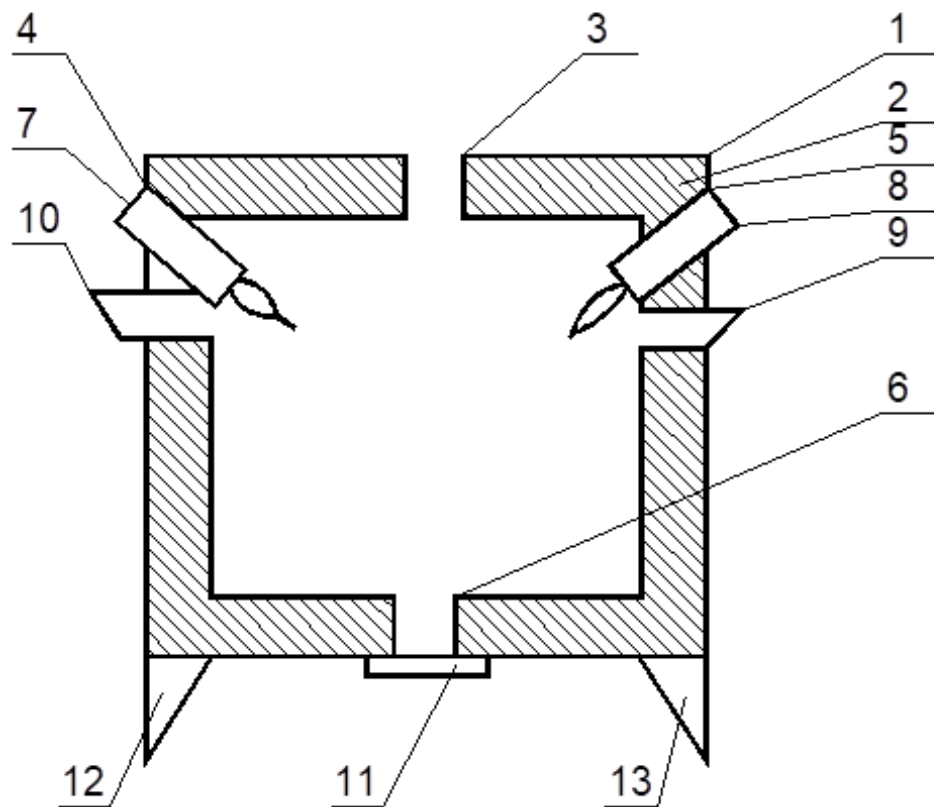
Синтез теплоизоляционных материалов



Корпус 1;
Проемы 2, 3 и 4;
Плазменный реактор 5;
Кварцевые трубопроводы 6;
Водоохлаждаемая рубашка 7;
Порошковый питатель 8;
Металлические формы 9,
10,11;
Пластинчатый конвейер 12.

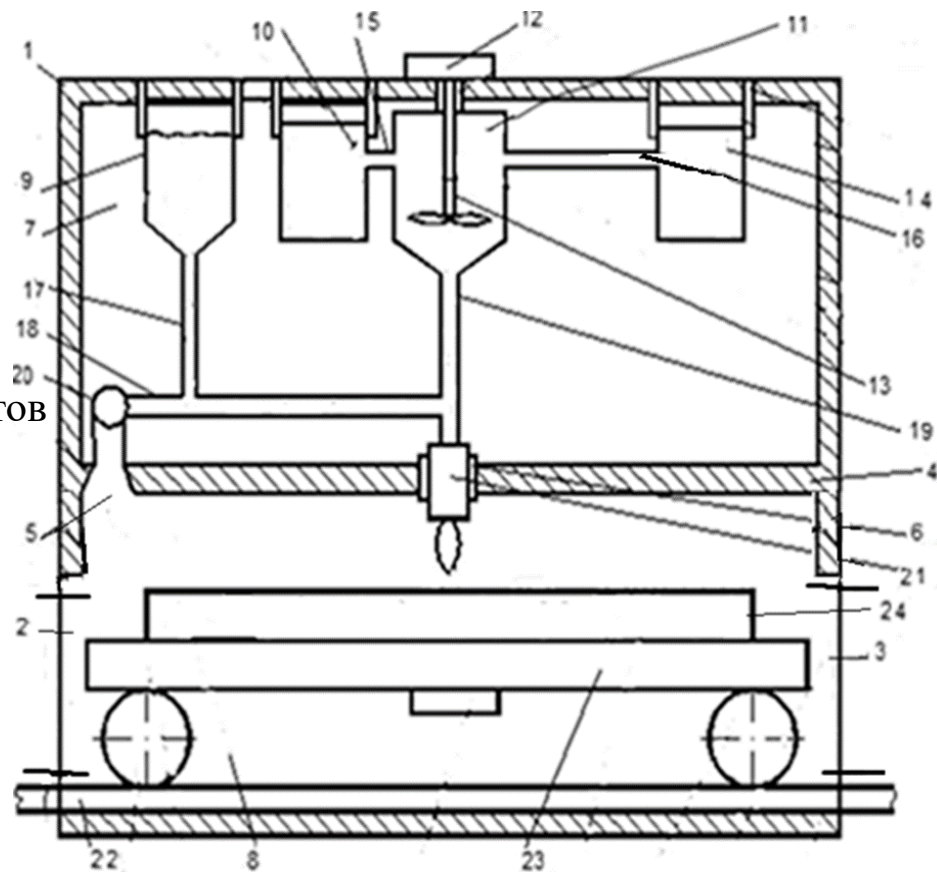
Плазменная печь для варки цветных стекол

1. Корпус стекловаренной печи;
2. Футеровка печи бадделеито-корундового огнеупора;
3. Вытяжная вентиляция для отвода отходящих плазмообразующих газов;
- 4,5. Прорезы для плазменных горелок;
6. Отверстие в поде печи для слива расплава и его выработки;
- 7, 8. Плазменные горелки;
- 9, 10. загрузочные карманы
11. Затвор ;
- 12, 13. Опорные ножки.

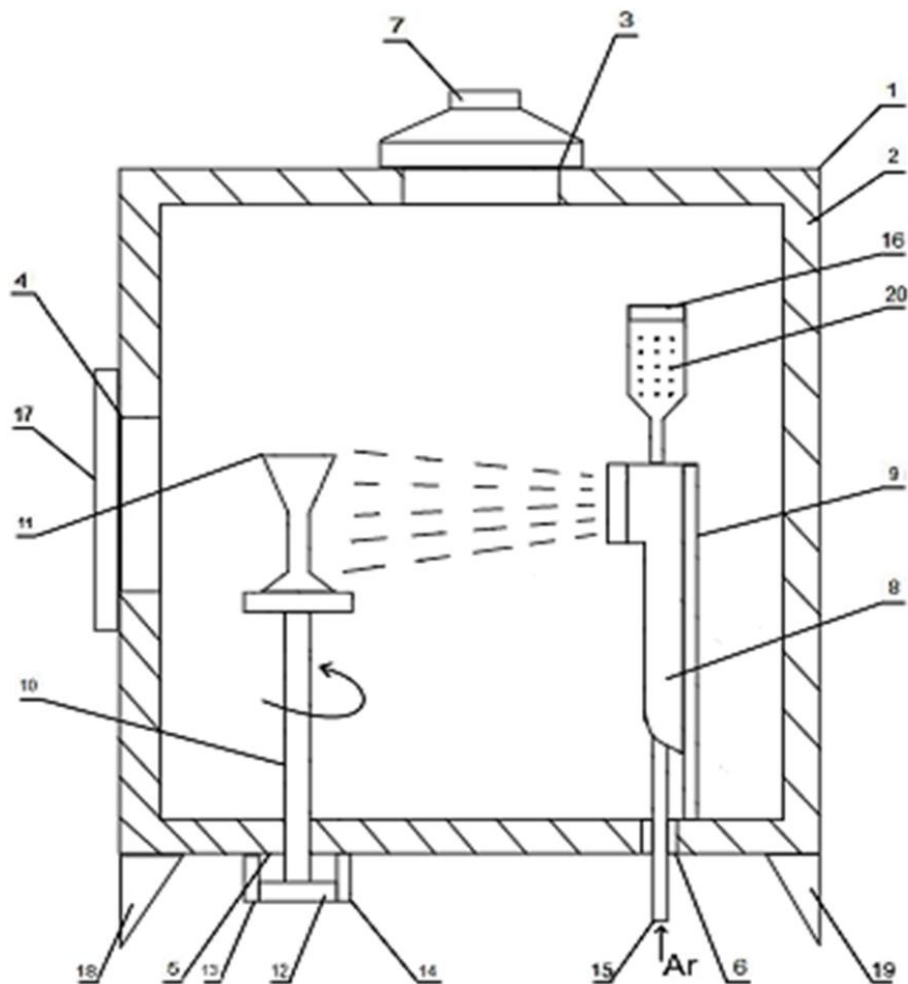


Плазменное глазурирование стеновых строительных материалов

- 1 – корпус
- 2 – входной проем
- 3 – выходной проем
- 4 – разделительная горизонтальная перегородка
- 5-8 – отверстие на 2 камеры
- 9 – бункер для металлического порошка
- 10 – бункер для жидкого стекла
- 11 – бункер для смешения и увлажнения компонентов гранулированного вещества
- 12 – электропривод
- 13 – пропеллерная мешалка
- 14 – бункер для гранул глиноземистого цемента
- 15-19 – трубопровод
- 20 – вентилятор
- 21 - плазмотрон
- 22 – платформа
- 23 – электроприводная тележка
- 24 – бетонная панель



Плазменное декорирование стеклоизделий



- 1 – корпус
- 2 – футерованный огнеупор
- 3-6 – проемы
- 7 – вытяжная вентиляция
- 8 – плазменная горелка
- 9 – кронштейн
- 10 – турнетка
- 11 – изделие
- 12 – электропровод
- 13,14 – кронштейн
- 15 – трубопровод
- 16 – порошковый питатель
- 17 – затвор
- 18,19 – опорные ножки



Спасибо за внимание!

Контактные данные:

**профессор
Бессмертный Василий Степанович
тел.: 8-908-788-22-23
e-mail: vbessmertnyi@mail.ru**