

К ВОПРОСУ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КРЕМНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Научная статья

Немчинова Н.В.<sup>1,\*</sup>, Тютрин А.А.<sup>2</sup>, Коновалов Н.П.<sup>3</sup>, Ломтиков Г.А.<sup>4</sup>, Олзоев Б.Н.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-9895-1709;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-9983-2680;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-6786-2711;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-7105-6341;

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (ninavn[at]yandex.ru)

**Аннотация**

Получение в электродуговых печах металлургического кремния (MG-Si) сопровождается образованием техногенных отходов (пыли и шлама газоочистки, рафинировочного шлама, отсевов кварцита и углеродистых материалов), что приводит к возникновению экологической опасности вблизи металлургического предприятия из-за накопления и складирования их на шламовых полях. Одним из путей решения данной экологической проблемы является поиск путей переработки данных отходов (в частности, шлама «мокрой» газоочистки) с целью дальнейшей реализации в других отраслях или возврата в технологический цикл. Нами были проведены исследования по переработке шлама газоочистки. Проведен анализ фазово-химического, гранулометрического состава данного отхода. Установлено, что твердая часть шлама состоит в среднем на 85-90% из SiO<sub>2</sub>, также в ней присутствует свободный углерод до ~10%. Результаты исследований грансостава материала показали, что при крупности частиц – 60+25 мкм средний выход класса будет составлять от 50 до 90%. Для переработки проб данного шлама, содержащих водную фазу, была исследована скорость осаждения частиц при добавлении коагулянтов (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, FeCl<sub>3</sub>, FeSO<sub>4</sub>). Показано, что наилучшие результаты достигаются при использовании Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. Рекомендована технологическая схема получения кремния с организацией дополнительных стадий обезвоживания шлама и брикетирования (окомкования) кремнеземсодержащего кека от фильтрации.

**Ключевые слова:** производство кремния, экологическая безопасность, MG-Si, техногенные отходы, шлам газоочистки, сгущение, фильтрация, коагулянты.

TO THE ISSUE OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF SILICON PRODUCTION

Research article

Nemchinova N.V.<sup>1,\*</sup>, Tyutrin A.A.<sup>2</sup>, Konovalov N.P.<sup>3</sup>, Lomtikov G.A.<sup>4</sup>, Olzoev B.N.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0001-9895-1709;

<sup>2</sup> ORCID : 0000-0001-9983-2680;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0001-6786-2711;

<sup>5</sup> ORCID : 0000-0001-7105-6341;

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

\* Corresponding author (ninavn[at]yandex.ru)

**Abstract**

The production of metallurgical silicon (MG-Si) in electric arc furnaces is accompanied by the formation of anthropogenic waste (dust and sludge from gas cleaning, refining slag, quartzite and carbonaceous materials), which leads to environmental hazards in the vicinity of the metallurgical plant due to their accumulation and storage in sludge fields. One of the ways to solve this environmental problem is to find ways to recycle these wastes (in particular, the sludge of 'wet' gas cleaning) for further implementation in other industries or return to the technological cycle. We have carried out researches on processing of gas cleaning sludge. The phase-chemical, granulometric composition of this waste was analysed. It is established that the solid part of the sludge consists on the average of 85-90% of SiO<sub>2</sub>, also in it there is free carbon up to ~10%. The results of studies of the material composition showed that at particle size of 60+25 microns, the average yield of the class will be from 50 to 90%. For processing of samples of this sludge containing aqueous phase, the rate of particle settling was investigated at addition of coagulants (Al<sup>2</sup>(SO<sup>4</sup>)<sup>3</sup>, FeCl<sup>3</sup>, FeSO<sup>4</sup>). It is shown that the best results are achieved when using Al<sup>2</sup>(SO<sup>4</sup>)<sup>3</sup>. The technological scheme of silicon production with organization of additional stages of sludge dewatering and briquetting (pelletizing) of silica cake from filtration is recommended.

**Keywords:** silicon production, environmental safety, MG-Si, technogenic waste, gas treatment sludge, thickening, filtration, coagulants.

**Введение**

Металлургическая отрасль является одной из передовых в секторе экономики любой страны. Потребность различных отраслей промышленности в кремнии металлургических марок (MG-Si, от англ. Metallurgical Grade Silicon) неуклонно растет. Это связано с применением его в качестве основного легирующего элемента, добавляемого при производстве кремнийсодержащих сплавов (силумины, ферросплавы, кремнистые бронзы и др.). MG-Si после глубокой очистки от примесных элементов широко используется для изготовления химической и полупроводниковой продукции.

В настоящее время ученые и производственники проводят исследования и внедряют в практике результаты экспериментов по повышению эффективности кремниевого производства, связанные с повышением качества выплавляемого MG-Si, решения экологических проблем за счет увеличения производительности газоочистного оборудования, утилизации образующегося техногенного сырья [1], [2], [4], [5], [6]. При этом улучшается экологическая ситуация в непосредственной близости от металлургических предприятий, выпускающих MG-Si, за счет снижения платы за хранение и уменьшения площадей размещения образующихся техногенных отходов.

#### Виды техногенных отходов кремниевого производства

MG-Si получают из кремнеземсодержащего сырья восстановлением углеродистыми восстановителями в электродуговых (руднотермических) печах при температуре свыше 2200 °С [1]. В АО «Кремний» ОК «РУСАЛ» (крупнейшем производителе MG-Si в России, расположенном в г. Шелехов) при производстве MG-Si кроме основного продукта образуются побочные продукты: отсев кварцита, образующаяся при дроблении кварцита (рудного сырья), мелкая фракция углеродистых восстановителей (нефтяного кокса, древесного и каменного углей), отсев от дробления MG-Si, рафинировочный шлак (продукт окислительного рафинирования, применяемого на предприятии), пыль циклонов и шлам «мокрой» газоочистки (см. рисунок 1).

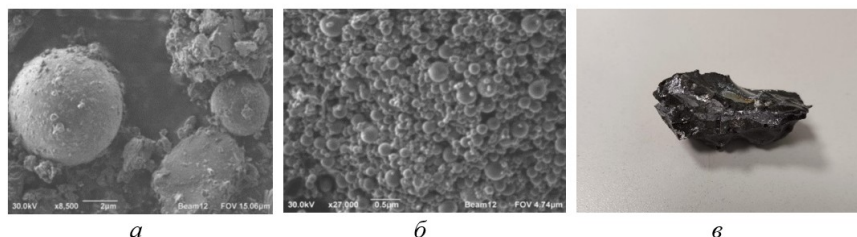


Рисунок 1 - Виды техногенного сырья с АО «Кремний»:  
а – электронное изображение частицы пыли циклонов; б – частицы шлама газоочистки; в – общий вид рафинировочного шлама

Ранее проведенные авторами [7] исследования химического состава техногенных мелкофракционных отходов АО «Кремний» показали, что пыль и шлам газоочистки состоят в основном из частиц кремнезема. Так, SiO<sub>2</sub> в шламе находится в шарообразном виде (средний диаметр частиц составляет 100 нм, анализ выполнен методом сканирующей электронной микроскопии). Согласно данным химического и рентгенофазового анализов содержание MG-Si в рафинировочном шлаке может находиться в диапазоне от 42 до 65%. Это свидетельствует о перспективности переработки данного техногенного сырья для извлечения целевого продукта кремния с получением товарных кремнийсодержащих продуктов (например, силуминов) [5], [8].

#### Объект исследования

Из практики промышленного производства известно, что при получении 1 т MG-Si улавливается в результате «мокрой» газоочистки (путем орошения содовыми растворами) до 700 кг кремнеземсодержащей пыли, в которой содержится, %, соответственно: 85-90 SiO<sub>2</sub>, 3-8 С, 2,1 SiC, до 5 другие компоненты.

Для наших исследований шлам газоочистки был отобран с АО «Кремний» со шламонакопителя. Отобранные образцы кремнеземсодержащего шлама представляли собой пульпу с содержанием твердого 80-100 г/дм<sup>3</sup>. Содержание твердого в пульпе определялось для объединенной пробы на основании массы отобранной пульпы и твердого материала, полученного после сушки пробы. Отношение жидкого к твердому по массе составило 2,1:1.

Проведенные исследования по определению плотности твердого материала (согласно ГОСТ 19440-94) показали следующие результаты: насыпная плотность – 0,39 г/см<sup>3</sup>, истинная – 1,82 г/см<sup>3</sup>. Жидкая фаза имела плотность, близкую к плотности воды – 1,02 г/см<sup>3</sup>, а кислотность – в среднем рН 8,8-9,0. Установлено, что твердая часть шлама состоит в среднем на 85-90% из SiO<sub>2</sub>, также в ней присутствует свободный углерод до ~10% [9].

При сравнении образцов пыли и шлама установлено, что шлам содержит большее количество частиц мелкой фракции, чем пыль газоочистки. Однако в целом химические составы пыли и шлама схожи, в таблице 1 приведены данные рентгенофлуоресцентного анализа пробы твердой части шлама, полученные на спектрометре «S8 TIGER» (Германия).

Таблица 1 - Химический состав шлама газоочистки АО «Кремний»

Наименование компонентов	Содержание, % масс.
С	9,7
SiO <sub>2</sub>	84,76
SO <sub>3</sub>	1,43
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,23
Na <sub>2</sub> O	0,86
CaO	0,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33

K <sub>2</sub> O	0,27
MgO	0,19
CuO	0,16
ZnO	0,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07
Cl	0,03
TiO <sub>2</sub>	0,03
MnO	0,02
PbO	42·10 <sup>-6</sup>
NiO	31·10 <sup>-6</sup>
SrO	23·10 <sup>-6</sup>
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5·10 <sup>-6</sup>

Также на дифрактометре ДРОН–3.0 (Россия) был выполнен рентгеноструктурный анализ пробы твердой части шлама газоочистки, который зафиксировал наличие SiO<sub>2</sub>.

Гранулометрический анализ изучаемого образца шлама газоочистки проводился на лазерном анализаторе размера частиц Analysette 22 NanoTecplus (Fritsch, Германия). Результаты гранулометрического состава шлама газоочистки кремниевого производства представлены в виде таблицы выхода класса (в %) (таблица 2).

Таблица 2 - Распределение частиц шлама по выходу класса

Выход класса, %	Крупность, мкм					Коэф. вариации, %	
	Среднее	Номер измерения					
		1	2	3	4		5
5	1,44	1,52	1,46	1,44	1,39	1,38	3,43
10	2,61	2,76	2,66	2,61	2,54	2,50	3,53
20	6,20	6,76	6,38	6,15	5,94	5,76	5,61
30	12,71	13,72	12,95	12,60	12,29	12,00	4,67
40	18,95	20,07	19,22	18,84	18,51	18,13	3,50
50	24,79	26,24	25,21	24,66	24,17	23,67	3,59
60	30,99	32,94	31,65	30,82	30,08	29,46	3,94
70	37,98	40,69	38,99	37,74	36,61	35,84	4,55
80	46,74	50,63	48,32	46,41	44,65	43,67	5,38
90	59,65	65,62	61,96	59,31	56,26	55,09	6,42
95	70,70	78,38	73,89	70,09	66,35	64,78	7,03
98	82,91	92,31	87,20	82,40	77,27	75,35	7,55
99	90,88	101,62	95,72	90,49	84,04	82,52	7,87

Результаты исследований показали, что при крупности –60+25 мкм средний выход класса будет составлять от 50 до 90%.

Таким образом, при идентификации шлама газоочистки методом лазерной дифракции установлено, что частицы измельченного шлама представлены крупностью минус 150 мкм, причем основной преобладающий класс (90%) в исследуемом образце – это частицы крупностью минус 59,65 мкм [10].

Целью наших исследований явилось усовершенствование технологии получения металлургического кремния за счет вовлечения в процесс плавки техногенного отхода – шлама газоочистки – с предварительным его обезвоживанием и брикетированием.

#### Методика исследования седиментации шлама

Для изучения скорости осаждения твердых частиц из шламовой пульпы был использован мерный цилиндрический сосуд (см. рисунок 2). После перемешивания суспензии сосуд устанавливали вертикально и отслеживали за осаждением из пульпы твердых частиц [11]. Продолжительность процесса оседания количество твердых частиц фиксировалась. Наблюдение за процессом было прекращено, когда положение границы раздела осажденной твердой фазы и осветленной жидкости не изменялось в течение 20-30 минут, в результате чего нами была построена кривая скорости осаждения, см. рисунок 3.

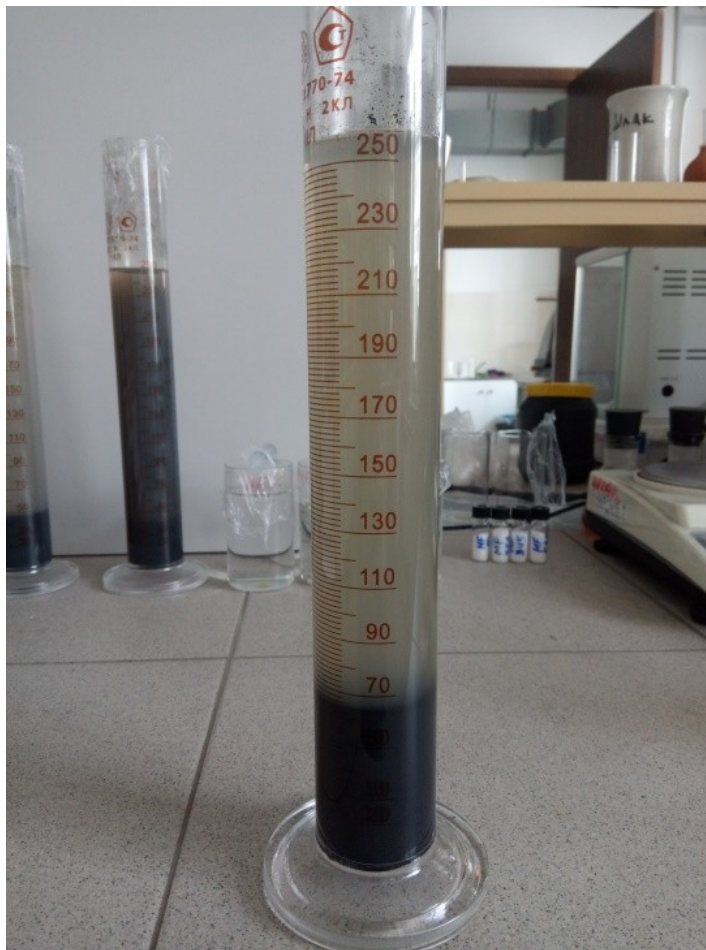


Рисунок 2 - Определение скорости осветления пульпы с применением различных реагентов

Исследования по сгущению шламов газоочистки кремниевого производства проводили с использованием цилиндров емкостью 250 мл. Ж:Т оставляли без изменения – 10:1.

На первоначальных этапах исследования определялась скорость осаждения частиц без использования дополнительных реагентов.

Замеряли время осаждения ( $t$ , мин) и высоту осаждения твердых частиц ( $H$ , мм), см. рисунок 3.

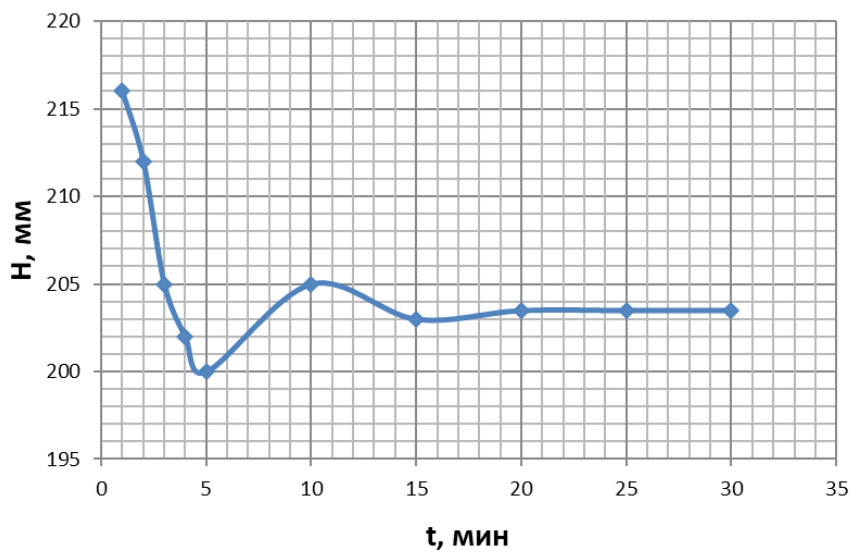


Рисунок 3 - Кривая кинетики осветления пульпы

Как видно из рисунка 3, в первые 5 мин происходило резкое осаждение твердых частиц, однако слив был достаточно мутный. Далее была рассчитана скорость осаждения по формуле:

$$V_0 = \frac{H_1}{t_{кр}} = 16/5 = 3,2 \text{ мм/мин} = 2,2 \text{ м/сут.}$$

Таким образом, скорость осаждения пульпы без дополнительной агрегации частиц по графическим зависимостям изменения границы раздела осветленной жидкости от времени составляет 2,2 м/сут, при этом слив является сильно мутным и является непригодным для повторного использования в системе «мокрой» газоочистки, используемой на АО «Кремний».

#### Определение мутности

Для количественного определения качества слива использовали определение мутности в диапазоне 1,0-100,0 ЕМФ (или ЕМ/дм<sup>3</sup>) турбидиметрическим методом, основанном на сравнении испытуемых проб со стандартной суспензией формазина [12]. Здесь ЕМФ – единицы мутности по формазину.

Оптическую плотность мутности измеряли с помощью фотометра КФК-3 (Россия) при  $\lambda = 520$  нм в кювете с толщиной оптического слоя 50 мм (см. рисунок 4).



Рисунок 4 - Фотометр КФК-3

Была приготовлена основная стандартная суспензия формазина концентрацией 400 ЕМФ (0,4 ЕМ/см<sup>3</sup>), срок хранения которой не более 2 мес. в герметичном флаконе в темном месте при 25 °С.

Для приготовления рабочих стандартных суспензий формазина 2,5 - 5 - 10 - 20 - 40 - 50 - 75 - 100 см<sup>3</sup> предварительно перемешанной промежуточной суспензии формазина вносили в мерные колбы на 100 см<sup>3</sup>, доводили до метки бидистиллированной водой. Полученные рабочие стандартные суспензии имели концентрации: 1 - 2 - 4 - 8 - 16 - 20 - 30 - 40 ЕМФ. На рисунке 5 представлены рабочие растворы, которые можно использовать в течение недели.

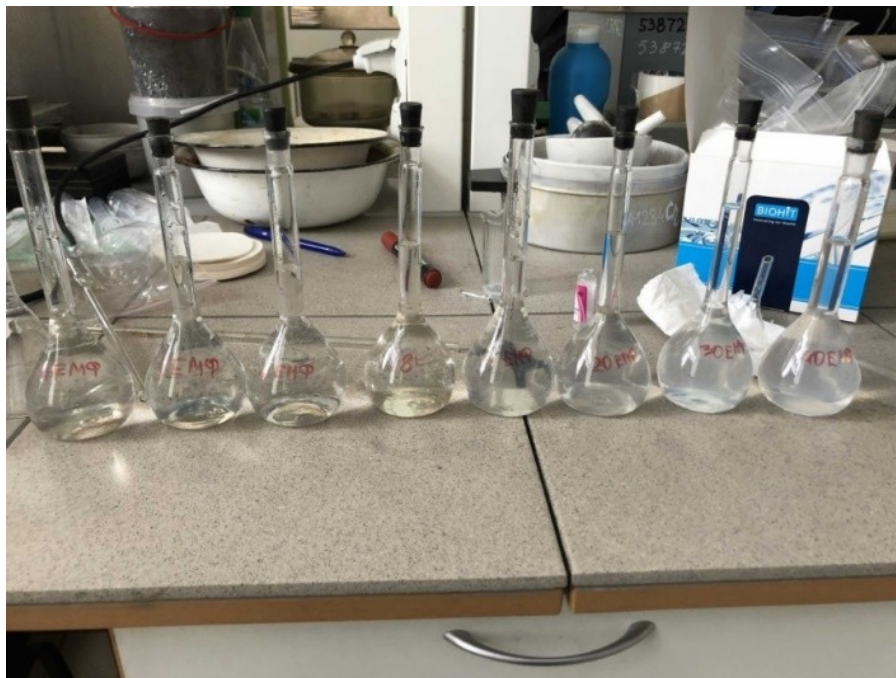


Рисунок 5 - Рабочие растворы

Для построения градуировочного графика были приготовлены образцы для градуировки с массовой концентрацией мутности 0,1-5,0 мг/дм<sup>3</sup> (или 1,0-40,0 ЕМФ). Анализ образцов для градуировки проводили в порядке возрастания их концентрации (см. рисунок 6).

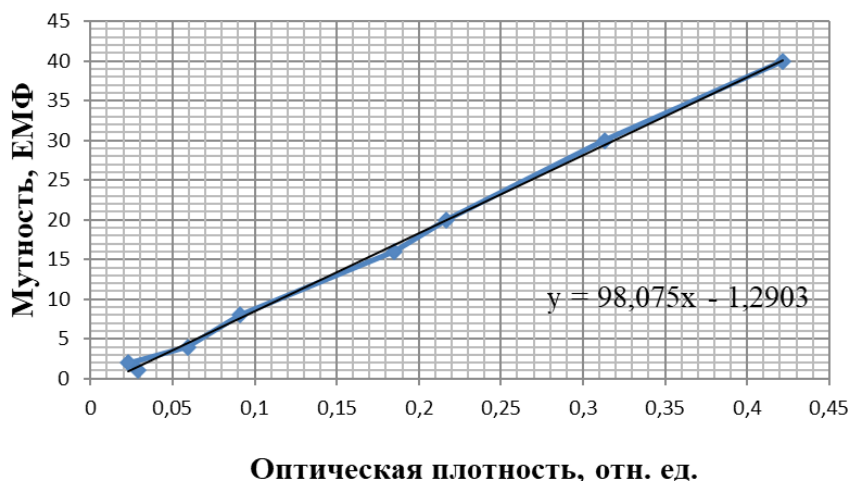


Рисунок 6 - Градуировочный график

В кювету с толщиной оптического слоя 50 мм вносили тщательно перемешанную испытуемую пробу и снимали показания прибора при  $\lambda = 520$  нм. Если цветность исследуемой пробы ниже 10° (по хром-кобальтовой шкале), то в качестве фона необходимо использовать бидистиллированную воду. Если цветность исследуемой пробы выше 10°, то фоном будет служить исследуемая проба, из которой удалены взвешенные вещества центрифугированием или фильтрованием через обработанные мембранные фильтры.

#### Исследования влияния добавок коагулянтов на скорость осаждения частиц

В качестве коагулянтов, способствующих ускорению агрегации частиц и, следовательно, их осаждению, широко используются железо-, алюминийсодержащие соли: сульфат алюминия  $Al_2(SO_4)_3$ , оксохлорид алюминия  $Al_n(OH)_mCl$ , алюминат натрия  $NaAlO_2$ , алюмокалиевые и алюмоаммонийные квасцы, хлорид железа  $FeCl_3$ , сульфат двухвалентного железа  $FeSO_4$ , сульфат трехвалентного железа  $Fe_2(SO_4)_3$ . Особенностью этих солей является способность образовывать в результате гидролиза малорастворимые оксигидраты [13]. В наших исследованиях мы опробовали в качестве коагулянтов  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $FeCl_3$ ,  $FeSO_4$ .

Мы исследовали зависимость мутности от количества вводимого коагулянта. Чтобы исследовать эту зависимость, мы приготавливали растворы коагулянтов концентрацией 10 %. Далее вводили по 1 мл приготовленного раствора в цилиндр с пульпой и осаждали частицы в течение 10 мин. Отбирали пробу слива и определяли мутность.

Для оценки эффективности использования  $Al_2(SO_4)_3$  в качестве коагулянта был приготовлен его раствор концентрацией 10%. При добавлении данного реагента мутность слива практически не изменялась, что связано с

кислотностью суспензии. Поэтому было принято решение снизить pH до 6,5-7; полученная зависимость мутности от количества добавляемого коагулянта представлена на рисунке 7.

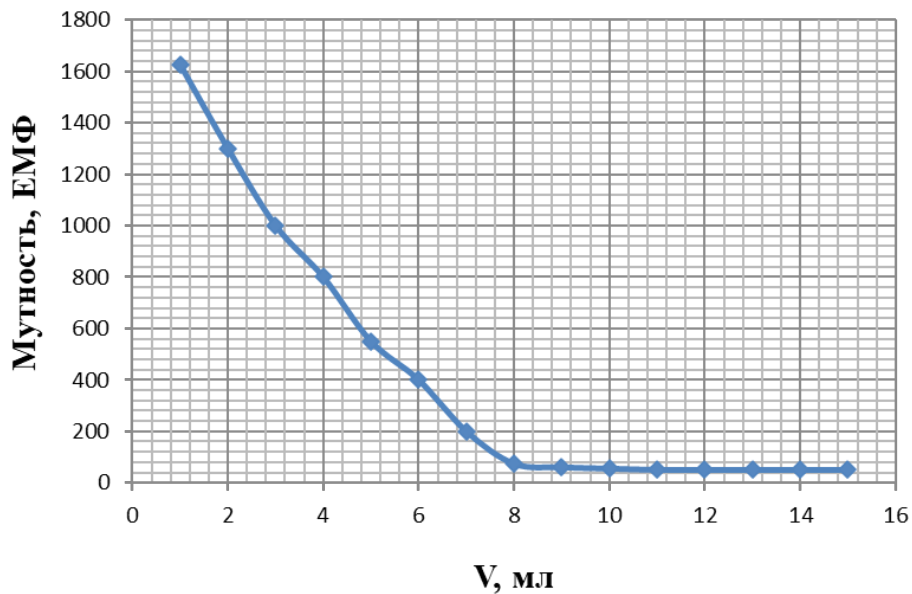


Рисунок 7 - Влияние объема вводимого коагулянта  $Al_2(SO_4)_3$  на мутность слива

Как видно из рисунка 8, мутность слива непрерывно снижается до достижения значения 10 мл, поэтому оптимальное значение составило 7-8 мл. При этом мутность слива составила 74-80 ЕМФ.

Однако при этом требуется снижение pH, что является нежелательным для возврата слива на его повторное использование в системе газоочистки и требует дополнительных затрат на добавление соды (компонента раствора «мокрой» газоочистки).

При обработке пульпы коагулянтом  $FeSO_4$  твердые частицы в процессе седиментации образовывали крупные хлопья, которые быстро оседали, обеспечивая осветление раствора. Твердые частицы образовывали плотный однородный осадок.

Применение добавки  $FeSO_4$  свыше  $30 \text{ мг/дм}^3$  позволило получить слив мутностью 120 ЕМФ (см. рисунок 8), при этом не требуется корректировать кислотность раствора, что является преимуществом.

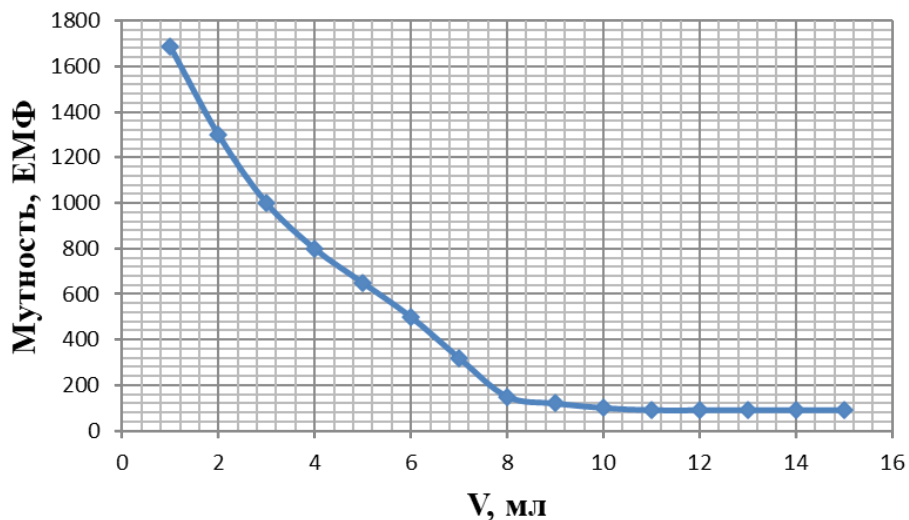


Рисунок 8 - Влияние объема вводимого коагулянта  $FeSO_4$  на мутность слива

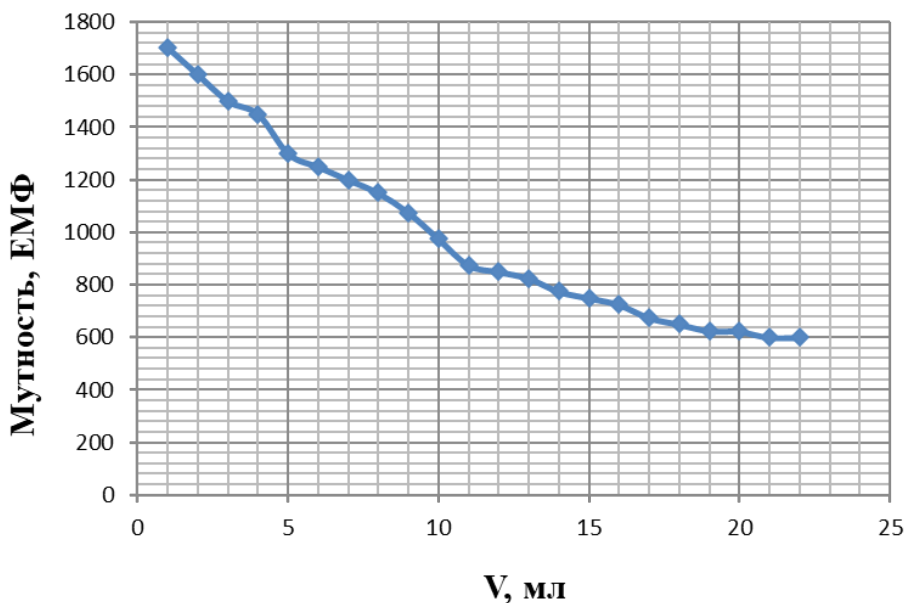


Рисунок 9 - Влияние объема вводимого коагулянта  $\text{FeCl}_3$  на мутность слива

Использование коагулянта  $\text{FeCl}_3$  не позволяет получить достаточно чистый слив даже через 10 минут от начала отстаивания. Как было нами установлено, скорость осаждения и осветления слива зависит от расхода коагулянта (см. рисунок 9).

Таким образом, по результатам исследований установлено, что максимальную скорость осаждения и осветления показал коагулянт  $\text{FeSO}_4$  с расходом 8–10 мл, однако оптимальное сочетание скорости осаждения твердых частиц и качества слива получено с использованием коагулянта  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

#### **Разработка рекомендаций для промышленного внедрения технологии переработки шлама кремниевого производства**

При изучении существующих методик по утилизации обезвоженного техногенного сырья, а также проведенных экспериментов по седиментации шлама газоочистки кремниевого производства нами была предложена и разработана технологическая схема по его переработке.

В соответствии с рекомендуемой технологической схемой газы, пройдя стадию «мокрой» газоочистки, в результате которой образуется шлам, направляют уже не на шламовые поля, а в сгуститель, где данный техногенный отход уплотняется, тем самым уменьшаясь в объеме.

Шлам по окончании сгущения фильтруется, осадок (кремнеземсодержащий кек) промывается на фильтре и в дальнейшем может быть использован в производстве цемента или других строительных материалах, а также в виде добавки к основному сырью. Исходя из свойств и химического состава шлама газоочистки (см. таблицу 2), его можно рассматривать в качестве, например, рудной составляющей шихты как дополнительной к основному кварцсодержащему сырью, из расчета того, что в среднем на 95 % он представлен частицами  $\text{SiO}_2$  (микросилики), а образующиеся объемы делают шлам перспективным сырьевым источником для производства металлургического кремния, что позволит утилизировать техногенные отходы и улучшить экологическую обстановку в зоне промышленного производства.

Осветленный раствор после сгущения можно использовать для стадии «мокрой» газоочистки (для уменьшения расхода бикарбоната натрия для приготовления раствора). Рекомендуемая технологическая схема получения кремния с организацией дополнительных стадий обезвоживания шлама и брикетирования (окомкования) микрокремнезема представлена на рисунке 10.

В данной технологической схеме рекомендован к использованию сгуститель (см. рисунок 10) – оборудование для непрерывного сгущения различных видов шлама и других сред перед их подачей на фильтрацию.

В процессе сгущения в шлам необходимо добавить коагулянт ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), в результате чего осадок коагулируется (твердые частицы шлама осаждаются, образуя хлопья), а фильтрат (несвязанный жидкий компонент) высвобождается и может подвергаться дальнейшей обработке или возвращаться в процесс по замкнутому циклу.

Поскольку объем шлама, подаваемого в сгуститель, может меняться (прежде всего, из-за изменений содержания сухого вещества подаваемого шлама), также необходимо корректировать дозу добавляемого коагулянта.

Процесс загустевания шлама может в некоторых случаях осуществляться без использования коагулянта. Однако параметры сгущения изменяются, что отражается, прежде всего, на ухудшении качества выделяемого фильтрата.



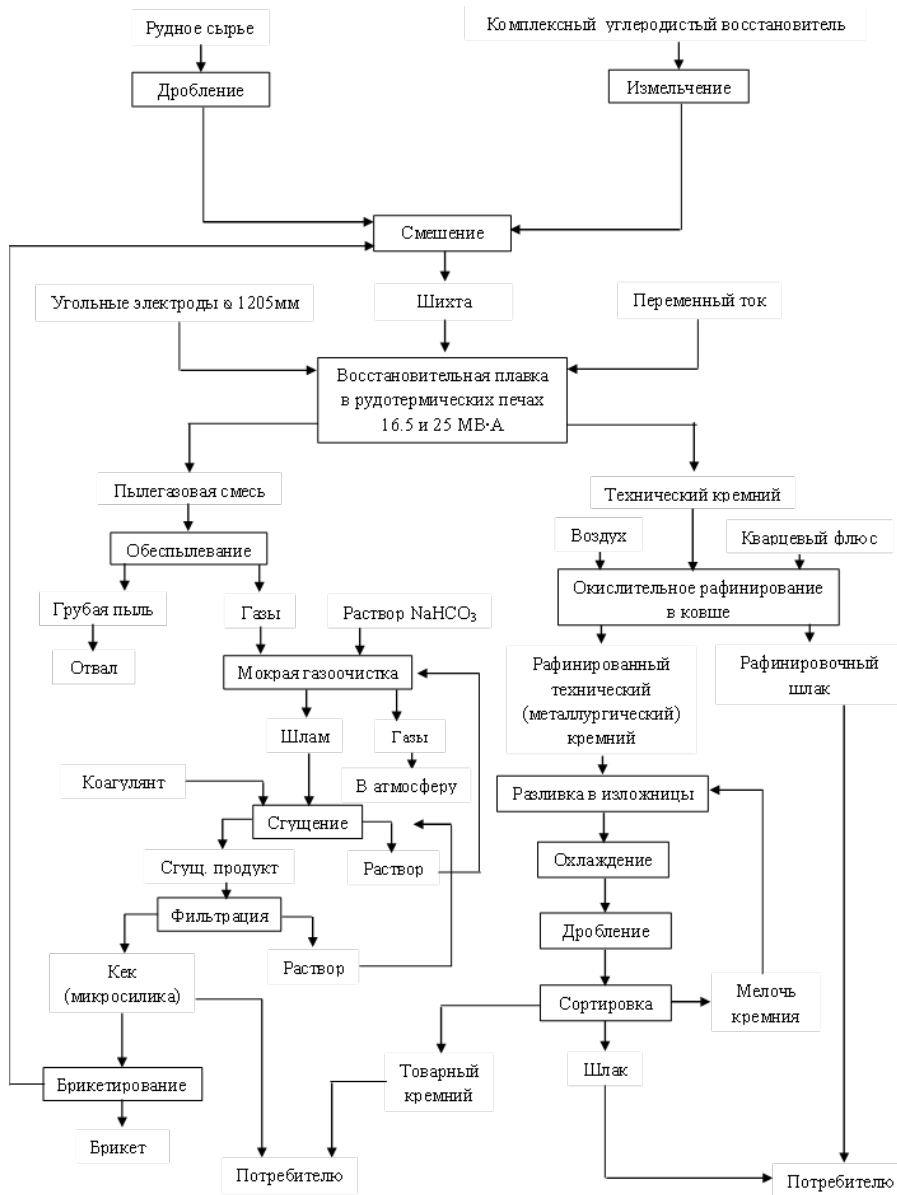


Рисунок 10 - Рекомендуемая технологическая схема получения кремния с организацией дополнительных стадий обезвоживания шлама и брикетирования (окомкования) микросилики

Примечание: по ист. [9]

Уплотненный шлам перекачивается на фильтрацию объемным шламовым насосом, производительность которого плавно регулируется с помощью преобразователя частоты. Операция фильтрации является одним из основных переделов аналогичных процессов в металлургии и обогащении [14], [15]. В качестве оборудования для фильтрации рекомендовано использовать ленточные вакуум-фильтры.

Полученный твердый осадок (кек) направляют на стадию брикетирования (гранулирования, окомкования). Полученные брикеты далее можно использовать в качестве добавки к основному сырью для выплавки кремния. Возможно получение дополнительной прибыли от продажи кека потребителям другой промышленной сферы (например, строительной индустрии) [16].

### Заключение

Шламы «мокрой» газоочистки являются техногенным сырьем, образующимся при производстве кремния в электродуговых печах и складываемом вблизи промышленного производства на шламовых полях. С целью решения проблемы экологической безопасности кремниевое производство нами были проведены исследования по изучению свойств данного материала, скорости седиментации и фильтрации. По полученным результатам экспериментов была рекомендована технологическая схема получения кремния с организацией дополнительных стадий обезвоживания шлама и брикетирования кека (микросилики) для реализации в другие отрасли (например, в строительную индустрию).

## Конфликт интересов

Не указан.

## Conflict of Interest

None declared.

## Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала

## Review

International Research Journal Reviewers Community

## Список литературы / References

1. Ringdalen E. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions / E. Ringdalen, M. Tangstad // *The Minerals, Metals & Materials Society* / Ed. by J.P. Downey, T.P. Battle, J.F. White. — Orlando: Wiley, 2012. — p. 195-203. — DOI: 10.1002/9781118364765.ch24
2. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology / M. Gasik. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. — 536 p. — DOI: 10.1016/C2011-0-04204-7
3. Nemchinova N.V. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials / N.V. Nemchinova, M.S. Leonova, A.A. Tyutrin [et al.] // *Metallurgist*. — 2019. — Vol. 63. — Iss. 1-2. — p.115-122. — DOI: 10.1007/s11015-019-00800-3
4. Ilin A.A. Distribution of Iron and Boron Between Silicon Metal Smelting Products in Industrial Saf using Borate Fluxes / A.A. Ilin, N.N. Zobnin, I.A. Pikalova [et al.] // *Silicon*. — 2024. — DOI: 10.1007/s12633-024-02895-z
5. Немчинова Н.В. Изучение химического состава рафинировочных шлаков кремниевого производства для поиска путей их рациональной переработки / Н.В. Немчинова, В.В. Хоанг, И.И. Апончук // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. — 2021. — Т. 25. — № 2. — с. 252-263. — DOI: 10.21285/1814-3520-2021-2-252-263
6. Немчинова Н.В. Гидрометаллургическое рафинирование металлургического кремния / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, А.А. Зайцева // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. — 2023. — Т. 66. — № 2. — с. 215-221. — DOI: 10.17073/0368-0797-2023-2-215-221
7. Kondrat'ev V.V. New production solutions processing silicon and aluminum production waste / V.V. Kondrat'ev, N.V. Nemchinova, N.A. Ivanov [et al.] // *Metallurgist*. — 2013. — Vol. 57. — № 5. — p. 455-459. — DOI: 10.1007/s11015-013-9754-5
8. Немчинова Н.В. Шлаки кремниевого производства / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, В.В. Хоанг [и др.] // *Международный научно-исследовательский журнал*. — 2022. — №11 (125). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.125.3
9. Tyutrin A.A. Analysis of the Composition and Properties of the Silicon Production Wet Cleaning Sludge to Identify Sustainable Techniques for its Processing / A.A. Tyutrin, A.S. Vologin // *Solid State Phenomena*. — Vol. 316. — p. 649-654. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.649
10. Тютрин А.А. Оценка возможности переработки шлама газоочистки кремниевого производства / А.А. Тютрин, А.А. Зайцева, А.С. Вологин // *Переработка природного и техногенного сырья: сб. научн. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий*. — Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2021. — с. 87-91.
11. Бауман А.В. Сгущение и водооборот. Ч I. Исследования и проектирование / А.В. Бауман — Новосибирск: Гормашэкспорт, 2020. — 30 с.
12. ПНДФ 14.1.2:4.213-05 «Количественный химический анализ вод» Методика измерений мутности проб питьевых, природных поверхностных, природных подземных и сточных вод турбидиметрическим методом по каолину и по формазину. — М.: Федеральный центр анализа и оценки техногенного воздействия, 2019. — 25 с.
13. Проскураков В.А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В.А. Проскураков, Л.И. Шмидт. — Ленинград: Химия, 1977. — 464 с.
14. Гонтарж Э.А. Эффективное решение задачи фильтрования в процессе разделения промышленных суспензий / Э.А. Гонтарж // *Металлург*. — 2010. — № 11. — с. 27-28.
15. Орешкина М.В. К вопросу фильтрования суспензии в динамическом фильтре-прессе / М.В. Орешкина // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. — 2019. — № 1. — с. 129-133.
16. Мункхтувшин Д. Опыт применения добавок микро- и наносилики из отходов кремниевого производства в бетонных технологиях / Д. Мункхтувшин, В.Б. Балабанов, К.Н. Пуценко // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. — 2017. — Т. 7. — № 3. — с. 107-115. — DOI: 10.21285/2227-2917-2017-3-107-115

## Список литературы на английском языке / References in English

1. Ringdalen E. Reaction mechanisms in carbothermic production of silicon, study of selected reactions / E. Ringdalen, M. Tangstad // *The Minerals, Metals & Materials Society* / Ed. by J.P. Downey, T.P. Battle, J.F. White. — Orlando: Wiley, 2012. — p. 195-203. — DOI: 10.1002/9781118364765.ch24
2. Gasik M. Handbook of ferroalloys: theory and technology / M. Gasik. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. — 536 p. — DOI: 10.1016/C2011-0-04204-7
3. Nemchinova N.V. Optimizing the Charge Pelletizing Parameters for Silicon Smelting Based on Technogenic Materials / N.V. Nemchinova, M.S. Leonova, A.A. Tyutrin [et al.] // *Metallurgist*. — 2019. — Vol. 63. — Iss. 1-2. — p.115-122. — DOI: 10.1007/s11015-019-00800-3
4. Ilin A.A. Distribution of Iron and Boron Between Silicon Metal Smelting Products in Industrial Saf using Borate Fluxes / A.A. Ilin, N.N. Zobnin, I.A. Pikalova [et al.] // *Silicon*. — 2024. — DOI: 10.1007/s12633-024-02895-z
5. Nemchinova N.V. Izuchenie himicheskogo sostava rafinirovochnyh shlakov kremnievogo proizvodstva dlya poiska putej ih racional'noj pererabotki [Research of chemical composition of refining slags of silicon production to find ways of their rational processing] / N.V. Nemchinova, V.V. Hoang, I.I. Aponchuk // *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo texnicheskogo*

- universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. — 2021. — Vol. 25. — № 2. — p. 252-263. — DOI: 10.21285/1814-3520-2021-2-252-263 [in Russian]
6. Nemchinova N.V. Gidrometallurgicheskoe rafinirovaniye metallurgicheskogo kremniya [Hydrometallurgical refining of metallurgical silicon] / N.V. Nemchinova, A.A. Tyutrin, A.A. Zaitseva // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya Metallurgiya [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. — 2023. — Vol. 66. — № 2. — p. 215-221. — DOI: 10.17073/0368-0797-2023-2-215-221 [in Russian]
7. Kondrat'ev V.V. New production solutions processing silicon and aluminum production waste / V.V. Kondrat'ev, N.V. Nemchinova, N.A. Ivanov [et al.] // Metallurgist. — 2013. — Vol. 57. — № 5. — p. 455-459. — DOI: 10.1007/s11015-013-9754-5
8. Nemchinova N.V. Shlaki kremnievogo proizvodstva [Silicon production slags] / N.V. Nemchinova, A.A. Tyutrin, V.V. Hoang [et al.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — №11 (125). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.125.3 [in Russian]
9. Tyutrin A.A. Analysis of the Composition and Properties of the Silicon Production Wet Cleaning Sludge to Identify Sustainable Techniques for its Processing / A.A. Tyutrin, A.S. Vologin // Solid State Phenomena. — Vol. 316. — p. 649-654. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.316.649
10. Tyutrin A.A. Ocenka vozmozhnosti pererabotki shlama gazoочистки kremnievogo proizvodstva [Assessment of the possibility of processing of silicon production gas cleaning sludge] / A.A. Tyutrin, A.A. Zaitseva, A.S. Vologin // Pererabotka prirodnogo i tekhnogenogo syr'ya [Processing of natural and technogenic raw materials]: a collection of scientific papers of students, undergraduates, graduate students and young scientists of the Institute of High Technologies. — Irkutsk: IRNIT Publishing House, 2021. — p. 87-91. [in Russian]
11. Bauman A.V. Sgushchenie i vodooborot. Ch. I. Issledovaniya i proektirovaniye. [Thickening and water rotation. P. I. Research and design] / A.V. Bauman — Novosibirsk: Gormasheksport, 2020. — 30 p. [in Russian]
12. PNDF 14.1:2:4.213-05 «Kolichestvennyj himicheskij analiz vod» Metodika izmerenij mutnosti prob pit'evykh, prirodnykh poverhnostnykh, prirodnykh podzemnykh i stochnykh vod turbidimetricheskim metodom po kaolinu i po formazinu [PNDF 14.1:2:4.213-05 “Quantitative chemical analysis of water” Methodology for measuring the turbidity of samples of drinking, natural surface, natural underground and waste water by the turbidimetric method using kaolin and formazin]. — M.: Federal Center for Analysis and Assessment of Technogenic Impact, 2019. — 25 p. [in Russian]
13. Proskuryakov V.A. Oчistka stochnykh vod v himicheskoy promyshlennosti [Wastewater treatment in the chemical industry] / V.A. Proskuryakov, L.I. Schmidt. — Leningrad: Khimiya, 1977. — 464 p. [in Russian]
14. Gontarzh E.A. Effektivnoe reshenie zadachi fil'trovaniya v processe razdeleniya promyshlennykh suspenzij [Effective solution of the filtering problem in the process of industrial suspensions separation] / E.A. Gontarzh // Metallurg [Metallurgist]. — 2010. — № 11. — p. 27-28. [in Russian]
15. Oreshkina M.V. K voprosu fil'trovaniya suspenzii v dinamicheskom fil'tre-pressе [To the issue of suspension filtration in a dynamic filter-press] / M.V. Oreshkina // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva [Bulletin of P.A. Kostychev Ryazan State Agrotechnological University]. — 2019. — № 1. — p. 129-133. [in Russian]
16. Munkhtuvshin D. Opyt primeneniya dobavok mikro- i nanosiliki iz othodov kremnievogo proizvodstva v betonnykh tekhnologiyah [Experience in the use of micro- and nanosilica additives from silicon production waste in concrete technologies] / D. Munkhtuvshin, V.B. Balabanov, K.N. Putsenko // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate]. — 2017. — Vol. 7. — № 3. — p. 107-115. — DOI: 10.21285/2227-2917-2017-3-107-115 [in Russian]