

МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья
УДК 621.923:621.922
EDN: DCKLDB
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-598-610



Исследование процесса получения жидкого стекла из кремнегеля для использования в металлургии

И.Н. Пягай^{1✉}, В.М. Сизяков², Я.А. Свахина³, М.Е. Титова⁴, В.В. Мирошниченко⁵

¹⁻⁵Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Резюме. Цель исследования – изучение возможности получения раствора силиката натрия (жидкого стекла) с использованием техногенного сырья для последующего применения в металлургической практике. Объектом исследования являлся промышленный отход производства фторида алюминия – кремнегель, представляющий собой тонкодисперсный порошок диоксида кремния с содержанием влаги более 55% масс. Кремнегель был подготовлен путем проведения его очистки с использованием низкоконтрированного раствора серной кислоты. Процесс получения жидкого стекла проводился с использованием системы реакторов HEL Auto-Mate Reactor System. Определение содержания кремния в растворе осуществлялось на анализаторе Shimadzu EDX-7000P рентгенофлуоресцентным методом. Для определения щелочи в полученном продукте был использован титриметрический метод анализа. Проведение предварительного процесса очистки позволило получить кремнегель с содержанием аморфного диоксида кремния более 98% масс. По результатам исследования были установлены оптимальные параметры процесса получения жидкого стекла: температура – 100°C, время процесса – 4,5 ч, скорость перемешивания – 300 об/мин и концентрация исходного щелочного раствора – от 10 до 17,5% масс. Полученный раствор жидкого стекла имел массовое содержание диоксида кремния от 16,65 до 23,77% масс. и силикатный модуль от 2,72 до 3,16, что удовлетворяет требованиям товарной продукции, реализуемой в различных отраслях промышленности. На основе проведенных экспериментов предложены оптимальные параметры процесса получения жидкого стекла из техногенного сырья – кремнегеля. Жидкое стекло с полученными характеристиками в дальнейшем может быть использовано в качестве связующего материала в металлургических процессах.

Ключевые слова: жидкое стекло, силикат натрия, кремнегель, фторид алюминия, отходы, кремниевый модуль

Для цитирования: Пягай И.Н., Сизяков В.М., Свахина Я.А., Титова М.Е., Мирошниченко В.В. Исследование процесса получения жидкого стекла из кремнегеля для использования в металлургии // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 598–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-598-610>. EDN: DCKLDB.

METALLURGY

Original article

Study of the process of obtaining water glass from silica gel for use in metallurgy

Igor N. Pyagay^{1✉}, Victor M. Sizyakov², Yana A. Svakhina³, Marina E. Titova⁴, Vladimir V. Miroshnichenko⁵

¹⁻⁵Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. This study explores the possibility of producing a sodium silicate solution (liquid glass) using industrial raw materials for subsequent use in metallurgical practice. The object of the study was industrial waste from the production of aluminium fluoride, i.e., silica gel, which comprises a fine powder of silicon dioxide with a moisture content of over 55 wt %. Silica gel was purified using a low-concentration solution of sulfuric acid. The synthesis of liquid glass was carried out using the HEL Auto-Mate Reactor System. The silicon content in the solution was determined by X-ray fluorescence method using the Shimadzu EDX-7000P analyzer. To determine the alkali content in the resulting product, a titrimetric analysis method was used. The preliminary purification process allowed silica gel with an amorphous silica content of over 98 wt % to be obtained. The optimal parameters of the liquid glass production were defined: temperature – 100°C, process time – 4.5 hours,

mixing speed – 300 rpm, and the concentration of the initial alkaline solution – from 10 to 17.5 wt %. The resulting liquid glass solution had a mass content of silicon dioxide from 16.65 to 23.77 wt % and a silicate module from 2.72 to 3.16, which meets the requirements of marketable products for various industries. Based on the experimental results, optimal parameters for the production of liquid glass using industrial raw materials, i.e., silica gel, are proposed. Liquid glass with the defined characteristics can be further used as a binder in metallurgical processes.

Keywords: water glass, sodium silicate, silica gel, aluminum fluoride, waste, silica modulus

For citation: Pyagay I.N., Sizyakov V.M., Svakhina Y.A., Titova M.E., Miroshnichenko V.V. Study of the process of obtaining water glass from silica gel for use in metallurgy. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):598-610. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-598-610>. EDN: DCKLDB.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день мировой рынок силиката натрия разделен на четыре региона – Северную Америку, Европу, Азиатско-Тихоокеанский регион и Латинскую Америку. Наибольшая доля рынка принадлежит Азиатско-Тихоокеанскому региону, а именно – Китаю⁶. Китай является крупнейшим экспортером. В 2018 г. Китай экспортировал силикат натрия как в жидком, так и в твердом виде в количестве 304 тыс. т. В тот же год Польша экспортировала порядка 182 тыс. т силиката натрия, Германия – 93 тыс. т, Европейский Союз – 82 тыс. т и 65 тыс. т – Египет. Российская Федерация же в 2018 г. закупила у ряда стран около 30 тыс. т силиката натрия на общую сумму 7 млн долл⁷.

Товарный силикат натрия доступен как в твердой, так и в жидкой форме. Благодаря своим свойствам, а именно – показателям высокой термостойкости, водостойкости и стабильности в щелочных растворах, силикат натрия нашел применение в различных отраслях промышленности, таких как металлургическая, текстильная, бумажная, строительная, химическая, автомобильная и фармацевтическая [1–3].

Низкая стоимость и нетоксичность жидкого стекла (ЖС) обуславливает его применение в металлургии в качестве ингибитора коррозии углеродистой стали [4]. Жидкое стекло образует на поверхности металла силикатную пленку, состоящую из связей Si-O-Si, в результате чего коррозионное воздействие на металл замедляется [5]. Другим способом применения жидкого стекла в металлургии является его использование в качестве связующего материала для грануляции отходов производства кремния, содержащих более 85% масс. кремнезема. Авторами работ [6–8] была предложена методика окомкования шихты,

в состав которой входит пыль и шлам газоочистки, с использованием жидкого стекла в качестве связующего материала. Процесс производства кремния в руднотермических печах карботермическим восстановлением кварцитов сопровождается образованием большого количества кремнийсодержащей пыли и шлама, которые могут быть повторно возвращены в технологический цикл. Поскольку кремнезем в данных отходах представлен сферическими частицами со средним диаметром 100 нм, то его использование в качестве сырья требует предварительной грануляции (окомкования), чтобы избежать уноса материала при повторной термообработке.

Большой спрос на силикат натрия имеет строительная промышленность, где силикат натрия в твердой форме используют в качестве источника щелочи для получения геополимеров или щелочных активированных вяжущих из угольной летучей золы [9, 10]. Геополимеры на основе жидкого стекла разрабатываются как экологически чистые бетонные смеси, способные заменить портландцемент, сократить выбросы углекислого газа в атмосферу и продлить срок эксплуатации данных материалов в агрессивных средах [11–13].

Жидкий силикат натрия широко используется в химической промышленности как исходное сырье для получения аморфного диоксида кремния и молекулярных сит (цеолитов). Наночастицы диоксида кремния, полученные из силиката натрия по золь-гель технологии, могут применяться в фармацевтической промышленности и биотехнологии [14–16]. Для получения цеолитов жидкое стекло использоваться как источник кремния при получении исходного алюмосиликатного геля [17]. Цеолиты типа А, полученные на основе жидкого стекла, широко применяют в производстве синтетических моющих

⁶Sodium Silicate Market // Mordor Intelligence [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/sodium-silicate-market> (17.01.2023).

⁷World Integrated Trade Solution [Электронный ресурс]. URL: <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/RUS/year/2018/tradeflow/imports/partner/ALL/product/283919> (17.01.2023).



Рис. 1. Прогноз мирового рынка силиката натрия с 2023 до 2033 г
Fig. 1. Global market forecast for sodium silicate from 2023 to 2033

средств за счет своей высокой ионообменной способности [18, 19]. Согласно анализу рынка, ожидается, что к концу 2023 г. применение силиката натрия в производстве моющих средств, где используется преимущественно жидкий раствор (жидкое стекло), будет доминировать с долей мирового рынка почти 24,3% (рис. 1)⁸.

На территории Российской Федерации растворимый силикат натрия (силикат-глыбу),

из которого в дальнейшем получают жидкое стекло, производят менее десяти предприятий. Наиболее востребованным на рынке является растворимый силикат натрия, выпускаемый в соответствии ГОСТ Р 50418-92⁹ с содержанием диоксида кремния от 70,7 до 76,7% масс. и силикатным модулем от 2,6 до 3,6 в зависимости от направления использования [20]. Основной отечественный рынок производителей представлен тремя предпри-

Таблица 1. Производители жидкого стекла в России
Table 1. Water glass producers in Russia

Производитель	Объем производства, тыс. т/год	Характеристики товарного жидкого стекла			
		ρ , г/см ³	Содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс.		μ_{Si}
			Na ₂ O	SiO ₂	
АО «Кубаньжелдормаш» (г. Армавир, Краснодарский край)	3,6	1,36–1,47	8,7–12,2	24,3–31,9	2,6–3,0
ЗАО «Торговый дом «Стеклопродукт» (г. Рязань, Рязанская область)	–	Н: 1,48–1,52 С: 1,46–1,48 В: 1,41–1,43	Н: 11,5–13,5 С: 11,1–12,3 В: 9,5–11,0	Н: 29,0–31,0 С: 29,0–33,0 В: 29,5–32,0	Н: 2,4–2,6 С: 2,8–3,0 В: 3,1–3,3
ООО НПО «Силикат» (г. Бокситогорск, Ленинградская область)	13,2	1,30–1,60	–	–	2,0–3,5
НПП «Алектич» (г. Батайск, Ростовская область)	4,2	1,40–1,48	–	–	2,7–3,5
ООО «УМК» (г. Усолье-Сибирское, Иркутская область)	–	1,30–1,50	7,9–13,8	22,7–36,7	2,3–3,6
ПК «Промстеклоцентр» (г. Екатеринбург, Свердловская область)	–	1,10–1,60	–	–	1,4–3,5
АО «Салаватстекло» (г. Салават, Респ. Башкортостан)	–	1,36–1,50	–	–	1,5–3,6
ООО ПО «СибЛКЗ» (г. Новосибирск, Новосибирская область)	–	1,30–1,45	8,7–12,2	24,3–31,9	2,6–3,0

Примечания: Н – низкомодульное ЖС; С – стандартное ЖС; В – высокомодульное ЖС; ρ – плотность полученного ЖС при 20°C; μ_{Si} – кремниевый модуль.

⁸Market Research Survey. Rockville, 2022. 170 p.

⁹ГОСТ Р 50418-92. Силикат натрия растворимый. Технические условия. Введ. 01.01.1994.

иятиями: ОАО «Салаватстекло», ООО «Стекло», ЗАО «Скопинский строительный комбинат». Данные по производителям непосредственно жидкого стекла представлены табл. 1.

Существующие технологии производства силикат-глыбы имеют ряд недостатков, в число которых входит энергоемкость, длительность и многостадийность процесса [21]. При получении 100 кг продукта необходимо использовать порядка 76 кг песка и 44 кг соды, а также провести процесс нагрева шихты до температуры 1300–1400°C. Полученную силикат-глыбу использует ряд предприятий для производства небольших партий жидкого

стекла для удовлетворения собственных нужд путем растворения силикат-глыбы во вращающихся или стационарных автоклавах. Единичная мощность цехов в данном случае не превышает порядка 15–20 тыс. т/год. По причине сложности данного процесса на сегодняшний день активно идет работа по созданию экономически более эффективной технологии с применением нетрадиционных источников кремнийсодержащего сырья [22]. Получение жидкого стекла из вторичных ресурсов, таких как отходы ферросилициевой промышленности, опоки, золы рисовой шелухи, ограничено содержанием сторонних

Таблица 2. Получение жидкого стекла из вторичного сырья
Table 2. Water glass production from recycled resources

Источник	Исходное сырье	Содержание компонентов в исходном сырье, % масс.	Параметры процесса получения жидкого стекла		Характеристики полученного жидкого стекла			
			время, ч	температура, °C	ρ , г/см ³	содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс.		μ_{Si}
						SiO ₂	Na ₂ O	
[23]	Отход производства ферросилиция - микрокремнезем	β -SiC + графит: 6-14 SiO ₂ (аморфный): 86-94	–	63–65	1,27–1,40	–	–	1,00–4,00
[24]	Фракционированный кварцевый песок	SiO ₂ : 95-98 H ₂ O: 0,1-1,5 ReO: 1,7-2,83	3–8	200–250	–	–	–	2,00–3,60
[25]	Порошок кизельгура	SiO ₂ : 87-92 Остатки органических соединений: более 10	0,25–0,5	90–95	1,39–1,41	28,10–28,90	9,54–9,68	2,90–3,00
[26]	Продукт разложения серпентинита соляной кислотой	SiO ₂ (аморфный): 84,4 MgO: 7,34 CaO: 2,86 Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃ : 2,08	0,25–1,0	90–95	1,40–1,42	28,03–29,67	9,71–9,95	2,90–3,00
[27]	Зола рисовой шелухи	SiO ₂ : 90-94 MgO: 0,8-1,0 CaO: 0,5-1,1 Fe ₂ O ₃ : 0,2-0,5 Al ₂ O ₃ : 0,5-1,5 C: 3-4	1–2	80–120	–	28–33	13,00–16,00	1,90–2,30
[28]	Опока	SiO ₂ : 84 Al ₂ O ₃ : 5,62 Fe ₂ O ₃ +FeO: 2,91 CaO: 0,97	1–3	90–95	1,18–1,44	11,07–35,56	3,23–11,74	2,62–3,94
[29]	Кремнесодержащая ферропыль	SiO ₂ : 93,31 K ₂ O: 1,5 Al ₂ O ₃ : 1,20 FeO: 1,12 MgO + CaO: 1,41 SO ₃ + N ₂ O: 1,35	1	105	1,42–1,45	–	–	3,00
[30]	Продукт разложения нефелинового концентрата азотной кислотой	SiO ₂ : 77	0,25–1	40–80	1,35–1,39	24,3–29,3	8,20–10,30	2,90–3,43

примесей, а также недостатком теоретических данных исследуемых процессов. Данные по получению жидкого стекла из вторичных ресурсов, известных на сегодняшний день, представлены в табл. 2.

Из всех известных нетрадиционных источников сырья для получения жидкого стекла наибольший интерес представляет кремнегель, поскольку содержит в пересчете на сухое вещество до 70% масс. аморфного диоксида кремния. При этом чистый аморфный диоксид кремния представляет большую ценность для различных отраслей промышленности [31, 32].

Кремнегель является остатком производства двух технологических процессов: производства фторида алюминия и производства минерального удобрения – суперфосфата [33, 34]. Так, например, при производстве фторида алюминия на 1 т товарной продукции образуется от 0,85 до 2,85 т гидратированного кремнегеля с содержанием влаги более 40% масс. [35]. В то время как доля кремнегеля, поступающего в отвалы с предприятий по производству фосфорных удобрений, небольшая и составляет 1,6–1,8 кг на 1 т суперфосфата¹⁰. Промышленный кремнегель практически не задействуется в производстве, и в отвалы с российских предприятий ежемесячно

направляется более 45 тыс. т отходов [36]. При этом аналогичные производства действуют на территориях других стран, например, Беларуси и стран Прибалтики.

Как и всевозможные отходы предприятия, кремнегель содержит большое количество исходных примесей. Содержание соединений фтора и алюминия в составе кремнегеля достигает порядка 30% масс. в пересчете на сухое вещество [37]. Примеси фтора в нем представлены преимущественно в виде фторид- и кремнефторид-ионов, где на долю кремнефторид-ионов (SiF_6^{2-}) приходится около 20% масс. от общего содержания фторсодержащих соединений.

Как известно, получение силиката натрия путем растворения кремнесодержащих соединений в растворе щелочи ингибируется в присутствии кремнефторидионов, и при концентрации данных примесей в количестве более 3% масс. процесс растворения прекращается [38]. Примеси алюминия в свою очередь не оказывают влияния на процесс получения жидкого стекла, поскольку они способны растворяться в щелочных растворах с образованием комплексных соединений, но их содержание в пересчете на Al_2O_3 в готовом ЖС, согласно ГОСТ 13078-2021¹¹, не должно превышать значений более 0,2–0,9% масс. Исходя из этого, разработка оптимального способа приготовления жидкого стекла из кремнегеля требует стадии очистки

Таблица 3. Получение жидкого стекла из кремнегеля
Table 3. Water glass production from silica gel

Источник	Подготовительная стадия обработки исходного кремнегеля	Реагент для получения жидкого стекла	Параметры процесса получения жидкого стекла		Характеристики полученного жидкого стекла			
			Т, °С	время, мин	ρ , г/см ³	содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс		μ_{Si}
						SiO_2	Na_2O	
[39]	Обработка раствором гидроксида натрия концентрацией 22–28% масс.	вода	90–95	20	1,39–1,45	34,36–35,85	11,94–13,12	2,61–3,00
[40]	Обработка кальцийсодержащим соединением	раствор NaOH (30–40% масс.)	температура кипения	20	1,22–1,39	20,70–26,75	6,90–9,50	2,80–3,10
[41]	Без стадии предварительной обработки	раствор NaOH (120 г/см ³)	75–90	330–450	1,15–1,19	–	–	2,64–4,30
[42]	Ультразвуковая обработка	сухой NaOH	92	15–18	1,38	24,60	10,20	2,50
[43]	Без стадии предварительной обработки	раствор NaOH концентрацией 40% масс.	92–98	35–60	–	25,74	13,20	2,00–3,50

¹⁰Голубин А.К., Никонорова С.П., Саханова Г.В. Туркевич С.Г., Шканов С.И., Варламов А.Р. и др. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления // Экологический консалтинг. 2008. № 4 (32). С. 12-59

¹¹ГОСТ 13078-2021. Стекло натриевое жидкое. Технические условия. Введ. 05.01.2021.

исходного сырья от примесей.

В современной литературе ранее уже были описаны различные способы получения жидкого стекла путем растворения кремнегеля в растворе гидроксида натрия (табл. 3).

Большая часть способов включает стадию предварительной очистки кремнегеля для удаления нежелательных примесей соединений фтора и алюминия, а также стадию механической или химической активации с целью аморфизации исходного сырья. Однако большинство предложенных методов не дало положительных результатов при повторе эксперимента с исследуемым кремнегелем, в связи с чем была проведена работа по поиску оптимальных параметров получения жидкого стекла из исследуемого сырья. В качестве подготовки кремнегеля был выбран метод очистки, ранее предложенный сотрудниками Санкт-Петербургского горного университета [44]. В работе было показано, что кислотная очистка промышленного кремнегеля растворами серной или соляной кислот позволяет получить продукт с высоким содержанием аморфного диоксида кремния. Положительные результаты были получены при использовании раствора серной кислоты концентрацией 1% масс., что позволило получить продукт с содержанием аморфного диоксида кремния порядка 99,8% масс., с практически полным удалением наиболее нежелательных соединений фтора. Очищенный таким способом кремнегель может использоваться в приготовлении ЖС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования с предприятия АО «Апатит» (Вологодская область), расположенном в г. Череповец, был отобран промышленный отход производства фторида алюминия – кремнегель. Кремнегель представлял собой тонкодисперсный порошок диоксида кремния с содержанием влаги около 55% масс.

Очистка кремнегеля от примесных соединений проводилась путем обработки кремнегеля раствором серной кислоты концентрацией 1% масс., при температуре 95°C в течение 1 ч при постоянном перемешивании. В результате процесса очистки примеси фтора удалялись с газообразными продуктами в виде паров кремнефтористой кислоты и фтороводорода, а примеси алюминия переходили в раствор в виде сульфата алюминия. Очищенный кремнегель промывали дистил-

лированной водой до нейтрального значения pH промывных вод и сушили при температуре 105°C в течение 3 ч.

Получение раствора силиката натрия проводили путем растворения очищенного кремнегеля в растворе гидроксида натрия в изотермических условиях при постоянной скорости перемешивания на установке HEL Auto-Mate Reactor System. Кремнегель равными порциями вносили в предварительно нагретый раствор гидроксида натрия и перемешивали до полного растворения в течение 4,5 ч. По окончании процесса полученный раствор фильтровали под вакуумом и анализировали. [45].

Анализ содержания соединений кремния в пересчете на диоксид кремния в полученных растворах проводили на приборе Shimadzu EDX 7000P рентгенофлуоресцентным методом при помощи калибровочных кривых, для построения которых был использован государственный стандартный образец ионов кремния (ГСО 8212-2002¹²). Для определения содержания щелочи в полученных растворах был использован титриметрический метод анализа, где в качестве индикатора был применен 1%-й раствор фенолфталеина.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический состав подготовленного кремнегеля представлен в табл. 4.

В ходе исследования процесса получения жидкого стекла растворением очищенного кремнегеля в модельном щелочном растворе была выполнена серия опытов для установления оптимального времени процесса, при котором в полученном растворе силиката натрия наблюдалось бы максимальное значение содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) (рис. 2). В соответствии с полученными результатами, при увеличении времени процесса до 4,5 ч содержание соединений кремния достигало 18,65% масс. Увеличение продолжительности процесса более 5 ч являлось неэффективным, поскольку концентрация растворенного диоксида кремния возрастала незначительно.

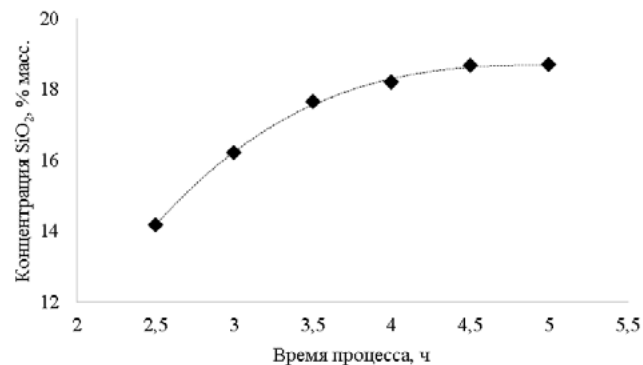
Исходя из ранее полученных данных в опубликованных специализированных источниках, известно, что температура растворения кремнегеля в щелочном растворе варьируется от

¹²ГСО 8212-2002. Описание типа стандартного образца. Стандартный образец состава раствора кремния (Приложение к свидетельству № 5408). М.: Эколого-аналитическая ассоциация «Эко-аналитика», 2018.

Таблица 4. Химический состав высушенного кремнегеля

Table 4. Chemical composition of dehydrated silica gel

Компонент	SiO ₂	F	Al ₂ O ₃	SO ₃	Cl	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	H ₂ O
После сушки при температуре 105°C в течение 3 ч									
Содержание, % масс.	76,306	11,927	8,618	0,079	0,022	0,031	0,009	0,008	3,000
После процесса очистки 1%-м раствором серной кислоты									
Содержание, % масс.	99,780	0,030	0,120	—	—	0,040	0,030	—	—

Рис. 2. Зависимость содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) в полученном растворе жидкого стекла от времени процессаFig. 2. Dependence of silicon compound content (in terms of SiO₂) in the obtained water glass solution on process time

75 до 100°C. В настоящей работе была проведена серия экспериментов с рассмотрением трех основных точек (рис. 3 и 4) получения жидкого стекла путем растворения подготовленного очищенного кремнегеля в чистых модельных щелочных растворах с содержанием гидроксида натрия 12,5 и 15% масс.

Результаты экспериментов показали, что повышение температуры процесса до 100°C ведет к получению раствора ЖС с содержанием соединений кремния (в пересчете на SiO₂) около 22,5% масс. Кремниевый модуль в данном случае достигает значения 2,75, что является удовлетворительным при рассмотрении дальнейшего использования получаемого раствора.

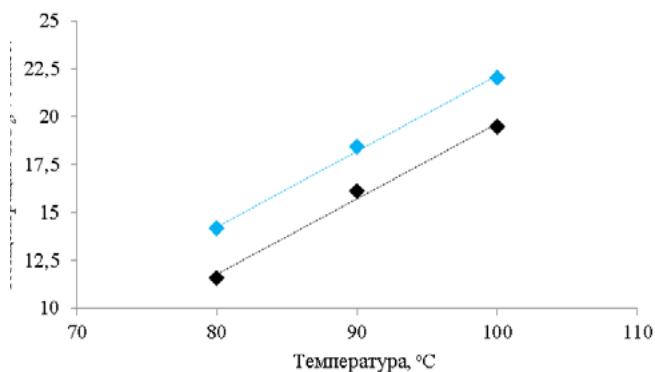
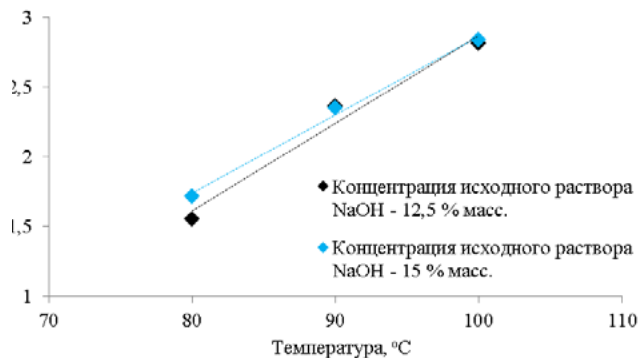
Рис. 3. Зависимость содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) в полученном растворе жидкого стекла от температуры процессаFig. 3. Dependence silicon compound content (in terms of SiO₂) in the obtained water glass solution on process temperature

Рис. 4. Зависимость кремниевого модуля жидкого стекла от температуры процесса

Fig. 4. Dependence silicon modulus of water glass on process temperature

Эксперименты по влиянию скорости перемешивания реакционной смеси на содержание соединений кремния в жидком стекле и его кремниевый модуль (рис. 5) показали, что скорость перемешивания незначительно влияет на процесс, и при изменении значения в диапазоне от 300 до 700 об/мин кремниевый модуль получаемого раствора практически не изменяется. Таким образом, опираясь на полученные данные о растворимости и величине кремниевого модуля, для дальнейшего исследования была выбрана: время процесса получения жидкого стекла – 4,5 ч, температура – 100°C и скорость перемешивания – 300 об/мин.

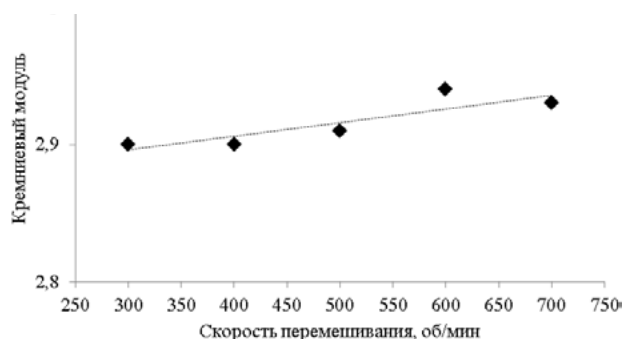


Рис. 5. Зависимость кремниевого модуля получаемого раствора жидкого стекла от скорости перемешивания (температура процесса – 100°C, время процесса – 4,5 ч)

Fig. 5. Dependence of silicon modulus of the obtained water glass solution on the mixing speed (process temperature - 100°C, process time - 4.5 h)

Дальнейшая часть исследований была посвящена изучению влияния исходной концентрации модельного щелочного раствора на характеристики получаемого жидкого стекла. В ходе экспериментов было получено ЖС при ранее определенных параметрах процесса и концентрации щелочи в исходной реакционной смеси от 5 до 20% масс. (рис. 6 и 7).

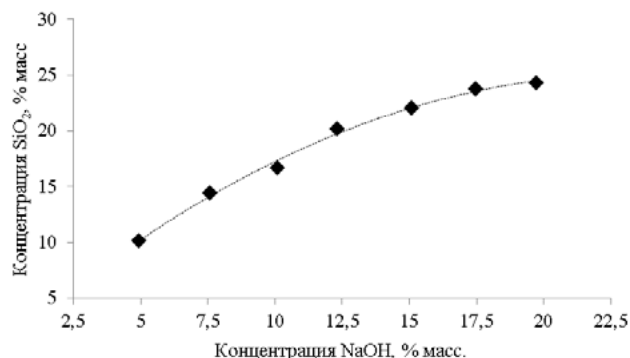


Рис. 6. Зависимость содержания соединений кремния (в пересчете на SiO₂) в полученном жидком стекле от исходной концентрации используемой щелочи
Fig. 6. Dependence silicon compound content (in terms of SiO₂) in the obtained water glass from the initial concentration of the used alkali

Исследование зависимости характеристик жидкого стекла от концентрации модельного щелочного раствора показало, что увеличение содержания гидроксида натрия в реакционной среде до 20% масс. позволяет получить жидкое стекло с содержанием соединений кремния в пересчете на SiO₂ более 24% масс. Однако одновременно с этим величина кремниевого модуля по мере возрастания концентрации щелочи в модельном растворе снижается до значения 2,41, что делает полученное жидкое стекло непригодным к использованию в промышленных целях. Наиболее оптимальные результаты наблюдались при concentra-

ции гидроксида натрия в исходном растворе от 10 до 17,5% масс., что соответствовало содержанию соединений кремния (в пересчете на SiO₂)

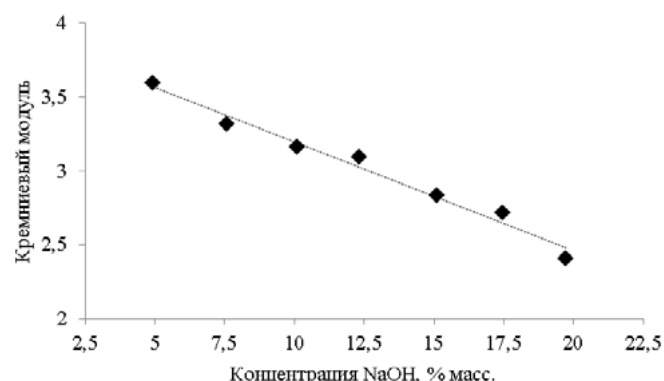


Рис. 7. Зависимость кремниевого модуля полученного жидкого стекла от исходной концентрации используемой щелочи

Fig. 7. Dependence silicon modulus of the obtained water glass from the initial concentration of the used alkali

от 16,65 до 23,77% масс. при величине кремниевого модуля от 3,16 до 2,72. По мере увеличения содержания растворенных веществ плотность полученного жидкого стекла пропорционально возрастала от 1,12 до 1,37 г/см³ (табл. 5).

Увеличение концентрации гидроксида натрия в модельном растворе, соответственно, ведет к возрастанию щелочи в получаемом растворе жидкого стекла, что объясняется образованием силиката натрия в процессе растворения кремнегеля. Концентрация свободной щелочи у исходного модельного раствора, безусловно, выше, чем у полученного раствора жидкого стекла (рис. 8). Это явление связано с образованием щелочных комплексных силикатов, находящихся в устойчивой форме в нейтральной области pH.

Таблица 5. Характеристики полученного жидкого стекла в зависимости от исходной концентрации щелочного раствора (температура процесса – 100°C, время растворения – 4,5 ч, скорость перемешивания – 300 об/мин)

Table 5. Characteristics of the obtained water glass depending on the initial concentration of alkaline solution (process temperature - 100°C, dissolution time - 4.5 hours, stirring speed - 300 rpm)

№ опыта	Концентрация исходного щелочного раствора, % масс.	Отношение компонентов SiO ₂ /Na ₂ O в исходной реакционной среде (моль/моль)	Характеристики полученного раствора силиката натрия (жидкого стекла)			
			содержание соединений в пересчете на оксиды, % масс.		ρ, г/см ³	μ _{Si}
			SiO ₂	Na ₂ O		
1	5,0	1,89	10,2	2,9	1,12	3,6
2	7,5	1,93	14,4	4,5	1,19	3,3
3	10,0	1,85	16,7	5,5	1,24	3,2
4	12,5	1,73	20,1	6,7	1,26	3,1
5	15,0	1,59	22,0	8,0	1,31	2,8
6	17,5	1,52	23,8	9,1	1,34	2,7
7	20,0	1,38	24,3	10,4	1,37	2,4

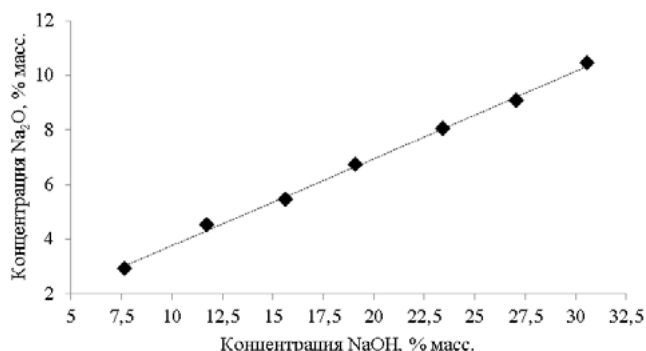


Рис. 8. Зависимость содержания щелочи (в пересчете на Na_2O) полученного жидкого стекла от исходного модельного щелочного раствора
Fig. 8. Dependence of alkali content (in terms of Na_2O) of the obtained water glass on the initial model alkaline solution

В соответствии с полученными результатами, приведенными в табл. 5, для получения из очищенного кремнегеля раствора силиката натрия с близкими к промышленному жидкому стеклу параметрами (кремниевый модуль от 2,7 до 3,2), предварительные параметры концентрации щелочи находятся в диапазоне от 10,0 до 17,5% масс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данной работы были исследованы основные параметры процесса получения натриевого жидкого стекла из отходов производства фтористого алюминия, предварительно очищенного от примесей соединений фтора и алюминия раствором серной кислоты (концентрацией 1% масс.) в течение 1 ч при температуре 95°C. В ходе исследования очищенный кремнегель подвергался растворению в чистом модельном растворе гидроксида натрия до образования раствора силиката натрия с кремниевым модулем от 2,72 до 3,16 при содержании соединений кремния в полученном растворе в пересчете на SiO_2 от 16,65 до 23,77% масс.

По итогам проделанной работы были определены оптимальные параметры процесса получения жидкого стекла: температура – 100°C, время процесса – 4,5 ч, скорость перемешивания – 300 об/мин: концентрация исходного щелочного раствора составила от 10 до 17,5% масс. Полученное жидкое стекло с данным кремниевым модулем наиболее приближено по характеристикам к товарному продукту и может быть использовано в различных металлургических процессах.

Список источников

1. Luling C., Rucker-Gramm P., Weilandt A., Beuscher J., Nagel D., Schneider J., et al. Advanced 3D textile applications for the building envelope // *Applied Composite Materials*. 2022. Vol. 29. Iss. 1. P. 343–356. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09941-8>.
2. Bakatovich A., Gaspar F. Composite material for thermal insulation based on moss raw material // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 228. P. 116699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699>.
3. Slonina M., Dziurka D., Smardzewski J. Experimental research and numerical analysis of the elastic properties of paper cell cores before and after impregnation // *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 9. P. 2058. <https://doi.org/10.3390/ma13092058>.
4. Zhang Bingru, He Chengjun, Chen Xi, Tian Zhipeng, Li Fengting. The synergistic effect of polyamidoamine dendrimers and sodium silicate on the corrosion of carbon steel in soft water // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 90. P. 585–596. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.054>.
5. Yang Jie, Li Zhongheng, Shi Jinfa, Yan Zhenwei. Study on the corrosion inhibition performance of sodium silicate and polyaspartic acid for 35CrMo steel // *International Journal of Electrochemical Science*. 2023. Vol. 18. Iss. 4. P. 100042. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100042>.
6. Немчинова Н.В., Минеев Г.Г., Тютрин А.А., Яковлева А.А. Разработка технологии руднотермической плавки окискованной шихты из техногенного сырья для производства кремния // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 12. С. 948–954. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-948-954>.
7. Немчинова Н.В., Леонова М.С., Тютрин А.А. Экспериментальные работы по плавке окомкованной шихты в производстве кремния // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 1. С. 209–217. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-209-217>.
8. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials // *Metallurgist*. 2019. Vol. 63. Iss. 1-2. P. 115–122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>.
9. Rasuli M.I., Tajunnisa Yu., Yamamura A., Shigeishi M. A consideration on the one-part mixing method of alkali-activated material: problems of sodium silicate solubility and quick setting // *Heliyon*. 2022. Vol. 8. Iss. 1. P. e08783. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08783>.
10. Дубовиков О.А., Белоглазов И.И., Алексеев А.А. Особенности применения пылеугольного топлива в комбинированных процессах химического обогащения // *Обогащение руд*. 2023. Вып. 6. С. 32–38. <https://doi.org/10.17580/or.2022.06.06>.
11. Tong K.T., Vinai R., Soutsos M.N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 201. P. 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>.
12. Villaquirán-Cacedo M.A. Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymers binders from metakaolin/boiler slag // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 227. P. 116621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.002>.

13. Criado M., Vicent M., García-Ten F.J. Reactivation of alkali-activated materials made up of fly ashes from a coal power plant // *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 3. P. 100043. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100043>.
14. Yadav M., Dwivedi V., Sharma S., George N. Biogenic silica nanoparticles from agro-waste: Properties, mechanism of extraction and applications in environmental sustainability // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 6. P. 108550. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108550>.
15. Supiyani, Agusnar H., Sugita P., Nainggolan I. Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine // *South African Journal of Chemistry*. 2022. Vol. 40. P. 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.001>.
16. Hwang Jongkook, Lee Jin Hyung, Chun Jinyoung. Facile approach for the synthesis of spherical mesoporous silica nanoparticles from sodium silicate // *Materials Letters*. 2021. Vol. 283. P. 128765. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128765>.
17. Krachnamram S., Chanapatttharapol K.C., Kamonsutthipajit N. Synthesis and characterization of NaX-type zeolites prepared by different silica and alumina sources and their CO₂ adsorption properties // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021. Vol. 310. P. 110632. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110632>.
18. Котова О.Б., Шабалин И.Л., Котова Е.Л. Фазовые трансформации в технологиях синтеза и сорбционные свойства цеолитов из угольной золы уноса // *Записки Горного института*. 2016. Т. 220. С. 526–531. <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.526>.
19. Koohsaryan E., Anbia M., Maghsoodlu M. Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: a review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 8. Iss. 5. P. 104287. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104287>.
20. Фиговский О.Л., Кудрявцев П.Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых наноконпозиционных материалов // *Инженерный вестник Дона*. 2014. Т. 47. № 2. С. 124–134.
21. Бондаренко Д.О., Бондаренко Н.И., Бессмертный В.С., Изофатова Д.И., Дюмина П.С., Волошко Н.И. Энергосберегающая технология получения силикат-глыбы для производства жидкого стекла // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. Vol. 2. Iss. 10. С. 111–115. https://doi.org/10.12737/article_59cd0c60148053.59501281.
22. Александрова Т.Н. Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы // *Записки Горного института*. 2022. Т. 256. С. 503–504.
23. Пат. № 2430018, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Р.В. Петрунин, В.В. Русина, С.А. Львова, Е.В. Корда. Заявитель и патентообладатель: Братский государственный университет. Заявл. 23.11.2009; опубл. 27.09.2011. Бюл. № 27.
24. Пат. № 2220906, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / М.И. Балабанов, В.Д. Петрухин. Заявитель и патентообладатель: М.И. Балабанов, С.А. Кальфа, С.М. Леденев, В.Д. Петрухин. Заявл. 06.06.2002; опубл. 10.01.2004.
25. Пат. № 2548097, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ изготовления жидкого стекла / А.С. Цатурян, Б.Е. Красавцев, В.Б. Симкин, Э.А. Александрова, Б.Л. Александров. Заявитель и патентообладатель: Кубанский государственный аграрный университет. Заявл. 30.09.2013; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 10.
26. Пат. № 2285665, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / А.А. Щелконогов, Н.Б. Овчинникова, Р.Г. Фрейдлина, А.И. Гулякин, Л.Н. Сабуров, С.А. Яковлева, М.В. Дудина. Заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Асбестовский магниевый завод» (ОАО «АМЗ»). Заявл. 11.01.2005; опубл. 20.10.2006. Бюл. № 29.
27. Пат. № 2160707, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения высокочистого жидкого стекла / В.В. Виноградов, Д.В. Виноградов, А.А. Балков. Заявитель и патентообладатель: В.В. Виноградов, Д.В. Виноградов, А.А. Балков. Заявл. 29.06.1998; опубл. 20.12.2000.
28. Пат. № 2188793, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Е.А. Никифоров, В.П. Елагин. Заявитель и патентообладатель: Е.А. Никифоров. Заявл. 16.06.2001; опубл. 10.09.2002.
29. Пат. № 2047559, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / В.И. Кочкин, Н.И. Пузачев, Н.И. Столярова. Заявитель и патентообладатель: В.И. Кочкин, Н.И. Пузачев, Н.И. Столярова. Заявл. 14.07.1992; опубл. 10.11.1995.
30. Пат. № 2480409, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / М.В. Таук, И.И. Николаева, Т.Н. Черкасова. Заявитель и патентообладатель: Открытое акционерное общество «Акрон». Заявл. 26.10.2011; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.
31. Артюшевский Д.И., Горшнева Е.А., Георгиева Э.Ю. Получение ценных продуктов из отходов производства фторида алюминия // *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. V Конгресса с междунар. участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021»* (г. Екатеринбург, 23–26 ноября 2021 г.). Екатеринбург: Институт металлургии УрО РАН, ООО Универсальная типография «Альфа Принт», 2021. С. 110–111. <https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.17.61.028>.
32. Bazhin V.Y., Glaz'ev M.V. Combined refractory materials with addition of technogenic waste for metallurgical assemblies // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021. Vol. 61. Iss. 2. P. 644–648. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00535-2>.
33. Пщелко Н.С. Использование наноразмерных гидрофобизирующих покрытий для получения электретов на основе диоксида кремния // *Записки Горного института*. 2018. Т. 230. С. 146–152. <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.146>.
34. Дубовиков О.А., Сундунов А.В. Кинетика выщелачивания термоактивированного боксита // *Обогащение руд*. 2021. № 4. С. 34–39. <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.06>.
35. Терещенко И.М., Дормешкин О.Б., Жих Б.П., Кравчук А.П. Комплексная переработка кремнегеля – многотоннажного отхода химических производств // *Нефтехимия – 2018: матер. I Междунар. науч.-техн. форума по химическим* <https://ipolitech.ru>

технологиям и по нефтегазопереработке (г. Минск, 27–30 ноября 2018 г.). Минск: БГТУ, 2018. Ч. 1. С. 83–86.

36. Позин М.Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, оксидов и кислот): монография. Ч. 1; 4-е изд. (испр.). Л.: Химия, 1974. 768 с.

37. Бажин В.Ю., Двойников М.В., Глазьев М.В., Куншин А.А. Исследование свойств тампонажных растворов с добавкой отхода производства фтористого алюминия // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. Iss. 3. С. 39–42. [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3\(327\)-39-42](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3(327)-39-42).

38. Мамченков Е.А., Акаев О.П., Акаева Т.К. Исследование температурно-временных характеристик взаимодействия модифицированного кремнегеля с гидроксидом натрия // Химия в интересах устойчивого развития. 2015. Т. 23. № 1. С. 97–102.

39. Пат. № 2660040, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Е.А. Мамченков, С.И. Мамченкова, А.В. Мамченков. Заявитель и патентообладатель: Мамченков Е.А. Заявл. 22.02.2017; опубл. 04.07.2018. Бюл. № 19.

40. Пат. № 2022925, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / Г.Н. Алексеева, В.П. Харитонов, Э.М. Рычкова, И.В. Макарова, А.С. Захаров. Заявитель: Пермский филиал Научно-производственного объединения Государственный институт прикладной химии. Патентообладатель: Алексеева Г.Н. Заявл. 04.03.1991; опубл. 15.11.1994.

41. Пат. № 2036145, Российская Федерация, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / В.П. Тунгусов, Н.И. Горшков. Заявитель: Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт алюминиевой, магниевой и электродной промышленности. Патентообладатель: Акционерное общество «Всероссийский алюминиево-магний институт». Заявл. 26.11.1992; опубл. 27.05.1995.

42. Пат. № 22980, Республика Беларусь, СО1В 33/32. Способ получения натриевого жидкого стекла / И.М. Терещенко, Б.П. Жих, А.П. Кравчук. Заявитель и патентообладатель: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». Заявл. 22.12.2018; опубл. 30.06.2020.

43. Пат. № 11706, Республика Беларусь, СО1В 33/32. Способ получения жидкого стекла / М.И. Кузьменков, В.В. Заранский. Заявитель и патентообладатель: Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет». Заявл. 19.01.2006; опубл. 30.04.2009.

44. Pyagay I.N., Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as Al_2O_3 - SiO_2 catalyst supports // Catalysts. 2022. Vol. 12. Iss. 2. P. 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>.

45. Пат. № 2023105153, Российская Федерация. Способ получения жидкого стекла / И.Н. Пягай, Я.А. Свахина. Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». Заявл. 07.03.2023.

References

1. Luling C., Rucker-Gramm P., Weilandt A., Beuscher J., Nagel D., Schneider J., et al. Advanced 3D textile applications for the building envelope. *Applied Composite Materials*. 2022;29(1):343-356. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09941-8>.

2. Bakatovich A., Gaspar F. Composite material for thermal insulation based on moss raw material. *Construction and Building Materials*. 2019;228:116699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699>.

3. Slonina M., Dziurka D., Smardzewski J. Experimental research and numerical analysis of the elastic properties of paper cell cores before and after impregnation. *Materials*. 2020;13(9):2058. <https://doi.org/10.3390/ma13092058>.

4. Zhang Bingru, He Chengjun, Chen Xi, Tian Zhipeng, Li Fengting. The synergistic effect of polyamidoamine dendrimers and sodium silicate on the corrosion of carbon steel in soft water. *Corrosion Science*. 2015;90:585-596. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.054>.

5. Yang Jie, Li Zhongheng, Shi Jinfa, Yan Zhenwei. Study on the corrosion inhibition performance of sodium silicate and polyaspartic acid for 35CrMo steel. *International Journal of Electrochemical Science*. 2023;18(4):100042. <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100042>.

6. Nemchinova N.V., Mineev G.G., Tjutrin A.A., Jakovleva A.A. Development of ore-thermal melting technology for agglomerated charge containing technogenic raw material in silicon production. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(12):948-954. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-948-954>.

7. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A. Experimental works on pelletized charge smelting in silicon production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(1):209-217. (In Russ.). 10.21285/1814-3520-2017-1-209-217.

8. Nemchinova N.V., Leonova M.S., Tyutrin A.A., Bel'skii S.S. Optimizing the charge pelletizing parameters for silicon smelting based on technogenic materials. *Metallurgist*. 2019;63(1-2):115-122. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00800-3>.

9. Rasuli M.I., Tajunnisa Yu., Yamamura A., Shigeishi M. A consideration on the one-part mixing method of alkali-activated material: problems of sodium silicate solubility and quick setting. *Heliyon*. 2022;8(1):e08783. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08783>.

10. Dubovikov O.A., Beloglazov I.I., Alekseev A.A. Specific features of the use pulverized coal fuel in combined chemical processing. *Obogashchenie rud*. 2023;6:32-38. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2022.06.06>.

11. Tong K.T., Vinai R., Soutsos M.N. Use of Vietnamese rice husk ash for the production of sodium silicate as the activator for alkali-activated binders. *Journal of Cleaner Production*. 2018;201:272-286. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.025>.

12. Villquirán-Cacedo M.A. Studying different silica sources for preparation of alternative waterglass used in preparation of binary geopolymer binders from metakaolin/boiler slag. *Construction and Building Materials*. 2019;227:116621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.002>.

13. Criado M., Vicent M., García-Ten F.J. Reactivation of alkali-activated materials made up of fly ashes from a coal power plant. *Cleaner Materials*. 2022;3:100043. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100043>.
14. Yadav M., Dwibedi V., Sharma S., George N. Biogenic silica nanoparticles from agro-waste: Properties, mechanism of extraction and applications in environmental sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022;10(6):108550. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108550>.
15. Supiyani, Agusnar H., Sugita P., Nainggolan I. Preparation sodium silicate from rice husk to synthesize silica nanoparticles by sol-gel method for adsorption water in analysis of methamphetamine. *South African Journal of Chemistry*. 2022;40:80-86. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.02.001>.
16. Hwang Jongkook, Lee Jin Hyung, Chun Jinyoung. Facile approach for the synthesis of spherical mesoporous silica nanoparticles from sodium silicate. *Materials Letters*. 2021;283:128765. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128765>.
17. Krachuamram S., Chanapattarapol K.C., Kamonsutthipajit N. Synthesis and characterization of NaX-type zeolites prepared by different silica and alumina sources and their CO₂ adsorption properties. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021;310:110632. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110632>.
18. Kotova O.B., Shabalin I.L., Kotova E.L. Phase transformations in synthesis technologies and sorption properties of zeolites from coal fly ash. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2016;220: 526-531. (In Russ.). <https://doi.org/10.18454/pmi.2016.4.526>.
19. Koohsaryan E., Anbia M., Maghsoodlu M. Application of zeolites as non-phosphate detergent builders: a review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;8(5):104287. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104287>.
20. Figovskii O.L., Kudryavtsev P.G. Water glass and water silicate solutions as a promising basis for technological production processes of new nanocomposite materials. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2014;47(2):124-134. (In Russ.).
21. Bondarenko D.O., Bondarenko N.I., Bessmertnyy V.S., Izofatova D.I., Dyumina P.S., Voloshko N.I. Energy-saving technology of producing silicate-clod for liquid glass production. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuhova = Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*. 2017;2(10):111-115. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59cd0c60148053.59501281.
22. Aleksandrova T.N. Complex and deep processing of mineral raw materials of natural and technogenic origin: state and prospects. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2022;256:503-504. (In Russ.).
23. Petrunin RV, Rusina VV, L'vova SA, Korda EV. *Water glass production method*. Patent RF, no. 2430018; 2009. (In Russ.).
24. Balabanov M.I., Petrukhin V.D. *Water glass production method*. Patent RF, no. 2220906; 2002. (In Russ.).
25. Tsaturyan A.S., Krasavtsev B.E., Simkin V.B., Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2548097; 2013. (In Russ.).
26. Shchelkonogov A.A., Ovchinnikova N.B., Freidlina R.G., Gulyakin A.I., SAburov L.N., Yakovleva S.A., Dudina M.V. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2285665; 2005. (In Russ.).
27. Vinogradov V.V., Vinograd D.V., Balkov A.A. *Production method of high-purity water glass*. Patent RF, no. 2160707; 1998. (In Russ.).
28. Nikiforov E.A., Elagin V.P. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2188793; 2001. (In Russ.).
29. Kochkin V.I., Puzachev N.I., Stolyarova N.I. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2047559; 1992. (In Russ.).
30. Tauk M.V., Nikolaeva I.I., Cherkasova T.N. *Method of water glass production*. Patent RF, no. 2480409; 2011. (In Russ.).
31. Artyushevskii D.I., Gorshneva E.A., Georgieva E.Y. Obtaining valuable products from aluminum fluoride production waste. In: *Fundamental'nye issledovaniya i prikladnye razrabotki protsessov pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh obrazovaniy: trudy V Kongressa s mezhdunarodnym uchastiem i Konferentsii molodykh uchenykh "Tekhnogen-2021" = Fundamental research and applied developments of recycling and utilization processes of technogenic formations: Proceedings of the 5th Congress with international participation and the Conference of young scientists "Technogen-2021"*. 23–26 November 2021, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Institute of Metallurgy, Ural Branch RAS, LLC Universal Printing House "Alfa Print", 2021; p. 110-111. (In Russ.). <https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.17.61.028>.
32. Bazhin V.Y., Glaz'ev M.V. Combined refractory materials with addition of technogenic waste for metallurgical assemblies. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2021;61(2):644-648. <https://doi.org/10.1007/s11148-021-00535-2>.
33. Pshchelko NS. Use of nano-dimensional hydrophobic coatings for obtaining electrets based on silicon dioxide. *Zapiski Gornogo Instituta = Journal of Mining Institute*. 2018;230:146-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.146>.
34. Dubovikov O.A., Sundurov A.V. Leaching kinetics for thermally activated bauxite. *Obogashchenie rud*. 2021;4:34-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/or.2021.04.06>.
35. Tereshchenko I.M., Dormeshikin O.B., Zhikh B.P., Kravchuk A.P. Complex recycling of silica gel – a large-tonnage waste of chemical production. In: *Neftekhimiya - 2018: Materialy I Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i po neftegazo-pererabotke = Petrochemistry – 2018: Proceedings of I International Science and Technology Forum on Chemical Engineering and Oil and Processing*. 27–30 November 2018, Minsk. Minsk: Belarusian State Technological University; 2018, vol. 1, p. 83-86. (In Russ.).
36. Pozin M.E. *Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids): monograph*. Part 1; 4th ed. (revised). Leningrad: Chemistry; 1974, 768 p. (In Russ.).
37. Bazhin V.Yu., Dvoynikov M.V., Glaz'ev M.V., Kunshin A.A. Investigation of the properties of cement slurries with the addition of aluminum fluoride production waste. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i more = Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2020;3:39-42. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3\(327\)-39-42](https://doi.org/10.33285/0130-3872-2020-3(327)-39-42).
38. Mamchenkov E.A., Akaev O.P., Akaeva T.K. Investigation of temperature-time characteristics of the interaction of modified silica gel with sodium hydroxide. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*. 2015;23:97-102. (In Russ.).
39. Mamchenkov E.A., Mamchenkova S.I., Mamchenkov A.V. *Method of water glass production*. Patent RF,

no. 2660040; 2017. (In Russ.).

40. Alekseeva G.N., Kharitonov V.P., Rychkova E.M., Makarova I.V., Zakharov A.S. Method of water glass production. Patent RF, no. 2022925; 1991. (In Russ.).

41. Tungusov V.P., Gorshkov N.I. Method of water glass production. Patent RF, no. 2036145; 1992. (In Russ.).

42. Tereshchenko I.M., Zhikh B.P., Kravchuk A.P. Method of sodium water glass production. Patent BY, no. 22980; 2018. (In Russ.).

43. Kuz'menkov M.I., Zaranskii V.V. Method of water glass production. Patent BY, no. 11706; 2006. (In Russ.).

44. Pyagay I.N., Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ catalyst supports. Catalysts. 2022;12(2):162.
<https://doi.org/10.3390/catal12020162>.

45. Pyagay I.N., Svakhina Ya.A. Method of water glass production. Patent Application RF, no. 2023105153; 2023. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пягай Игорь Николаевич,

д.т.н., старший научный сотрудник,
директор Научного центра «Проблем переработки
минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет, 199106,
г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия,
✉ igor-pya@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2575-934X>

Сизяков Виктор Михайлович,

д.т.н., профессор,
научный руководитель Научного центра «Проблем
переработки минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
kafmet@spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6531-6331>

Свахина Яна Андреевна,

инженер Научного центра «Проблем переработки
минеральных и техногенных ресурсов»,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
y_svakhina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7376-0156>

Титова Марина Евгеньевна,

магистрант,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
marina-titova-2000@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6846-2367>

Мирошниченко Владимир Викторович,

студент,
Санкт-Петербургский горный университет,
199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О, д. 2., Россия
vovamir02@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-7024-3036>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.05.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.05.2023 г.; принята к публикации 11.06.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Igor N. Pyagay,

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
Director of the Scientific Center
"Processing problems of mineral and technogenic
resources", Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line,
Vasilievsky Island, Saint Petersburg 199106, Russia
✉ igor-pya@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2575-934X>

Viktor M. Sizyakov,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Head of Research of the Scientific Center "Processing
problems of mineral and technogenic resources",
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia
kafmet@spmi.ru
<https://orcid.org/0009-0006-6531-6331>

Yana A. Svakhina,

Engineer of the Scientific Center
"Processing problems of mineral and technogenic resources",
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia,
y_svakhina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-7376-0156>

Marina E. Titova,

Master's Degree student,
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia,
marina-titova-2000@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-6846-2367>

Vladimir V. Miroshnichenko,

Student,
Saint Petersburg Mining University, 2, 21th line, Vasilievsky
Island, Saint Petersburg 199106, Russia
vovamir02@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0009-7024-3036>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 14.05.2023; approved after reviewing 29.05.2023; accepted for publication 11.06.2023.