

Tulaganov Sardor Anvarovich
U.A. Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies
Senior Researcher
E-mail: tulaganov@iplt.uz

Тулаганов Сардор Анварович
Институт ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова
Старший научный сотрудник
E-mail: tulaganov@iplt.uz

Tulaganov Sardor Anvarovich
U.A. Arifov nomidagi ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti
katta ilmiy hodim
E-mail: tulaganov@iplt.uz

SYNTHESIS OF HIGHLY DISPERSED AMORPHOUS SiO_2 BY THE AMMONIUM FLUORIDE METHOD

S.A. Tulaganov

Abstract. Amorphous silicon dioxide (SiO_2) nanoparticles with high dispersion are widely used in electronics, catalysis, polymer composites, construction, and medicine due to their large surface area, chemical stability, and low cost. In this work, a highly dispersed amorphous SiO_2 was synthesized by the ammonium fluoride method, which ensures a closed-loop process and high efficiency. Under optimal conditions ($T \leq 400$ °C, $\text{pH} = 8\text{--}9$, 20 wt.% NH_3 solution), the process yielded ~98% amorphous SiO_2 with a chemical purity of 99.97%. The method is energy-efficient, environmentally safe, and provides nanosilica powders that meet industrial requirements. The obtained results demonstrate the potential of this synthesis route for scalable industrial applications.

Keywords: *amorphous SiO_2 , ammonium fluoride synthesis method, nanoparticles, particle morphology, degree of dispersion.*

СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО АМОРФНОГО SiO_2 ФТОРАММОНИЙНЫМ МЕТОДОМ

С.А. Тулаганов

Аннотация. Аморфный диоксид кремния - SiO_2 наночастицы благодаря большой удельной поверхности, высокой химической стойкости и низкой себестоимости широко применяются в электронике, катализе, полимерных композитах, строительстве и медицине. В данной работе синтез высокодисперсного аморфного SiO_2 осуществлён фтораммонийным методом. При оптимальных условиях $T \leq 400$ °C, $\text{pH} = 8-9$, 20 мас.% раствора NH_3 достигнут выход ~ 98 % и чистота продукта 99,97 %. Процесс является энергоэффективным, экологически безопасным и предусматривает использование реагентов с замкнутым циклом регенерации. Полученные результаты демонстрируют перспективность данного метода для широкого промышленного применения.

Ключевые слова: аморфный SiO_2 , фтораммонийный метод синтеза, наночастицы, морфология частиц, степень дисперсности.

FTORAMMONIY USULIDA YUQORI DISPERSLI AMORF SiO_2 SINTEZI.

S.A. Tulaganov

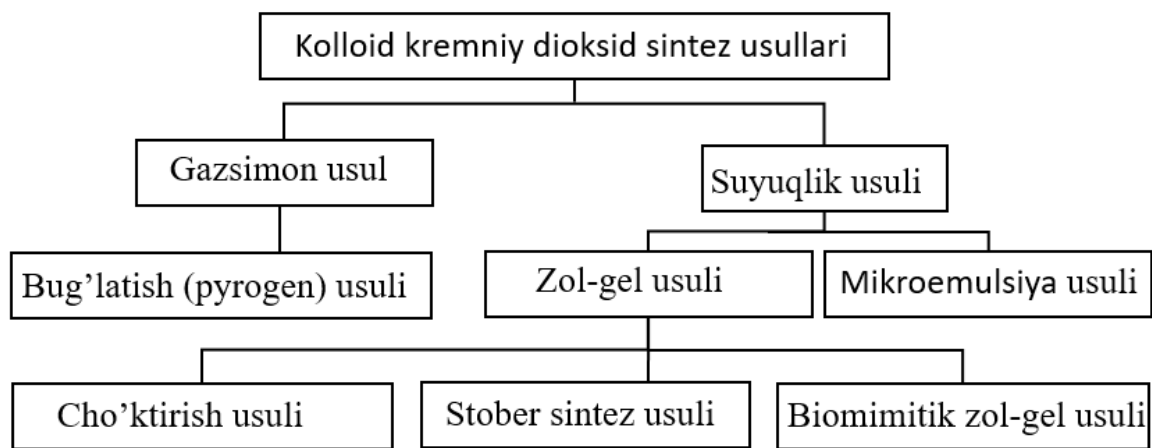
Annotatsiya. Amorf kremniy dioksidi - SiO_2 nanozarrachalari keng yuzaga ega bo'lgani, yuqori kimyoviy barqarorligi va arzonligi sababli elektronika, kataliz, polimer kompozitlari, qurilish va tibbiyotda keng qo'llaniladi. Ushbu ishda ftorammoniy usuli yordamida yuqori dispersli amorf SiO_2 sintezi amalga oshirildi. Optimal sharoitlarda $T \leq 400$ °C, $\text{pH} = 8-9$, 20 mass. % NH_3 eritmasi ~ 98 % chiqim va 99,97 % tozalikka erishildi. Jarayon energiya tejamkor, ekologik xavfsiz bo'lib, yopiq siklda qayta tiklanadigan reaktivlardan foydalanishni ta'minlaydi. Olingan natijalar mazkur usulning sanoat miqyosida keng qo'llash imkoniyatini ko'rsatadi.

Kalit soʻzlar: amorf SiO_2 , ftorammoniyli sintez usuli, nonozarralar, zarrachalarning morfologiyasi, disperslik darajasi.

Kirish

Soʻnggi oʻn yilliklarda nanomateriallar kimyosi va texnologiyasi fan va sanoatning eng tez rivojlanayotgan yoʻnalishlaridan biri hisoblanadi. Ularning orasida yuqori dispersli amorf kremniy oksidi - SiO_2 alohida ahamiyatga ega boʻlib, elektronika, kataliz, adsorbentlar, tibbiyot, qurilish, rezina-texnika va boshqa koʻplab sohalarda keng qoʻllaniladi [1; 2]. Bunday keng qoʻllanish sohasi SiO_2 ning yuqori kimyoviy barqarorligi, inertligi, rivojlangan sirt maydoni, sirt funksional guruhlarini modifikatsiya qilish imkoniyati va nisbatan past narxi bilan izohlanadi. Shu bois, yuqori sifatli va arzon nanodispers SiO_2 olishning ilmiy-texnologik asoslarini ishlab chiqish bugungi kunda dolzarb vazifalardan biridir.

Nanostrukturalar sintezining umumiy yondashuvlari sifatida adabiyotlarda ikki asosiy yoʻnalish koʻrsatiladi: “yuqoridan-pastga” va “pastdan-yuqoriga” usullari [3; 4]. “Yuqoridan-pastga” usullari mavjud makroskopik kristall va polikristall materiallarni mexanik yoki fizik taʼsirlar orqali mayda zarralarga parchalanishini anglatadi. Bu yondashuvlar nisbatan oddiy boʻlsa-da, zarrachalarning oʻlchamini nazorat qilish imkoniyati cheklangan, koʻpincha ularning shakli va fazaviy bir jinsliligi yetarli emas. “Pastdan-yuqoriga” usullari esa atom va molekulalardan boshlab zarrachalarni “yigʻish”ga asoslanadi. Ushbu yondashuv nanometr oʻlchamdagi, bir jinsli va nazorat qilinadigan xossalarga ega zarralarni olish imkonini beradi.



1-rasm. Kolloid SiO_2 ishlab chiqarishda qo'llaniladigan umumiy sanoat sintez jarayoni sxemasi [5].

Amorf SiO_2 ni sanoatda ishlab chiqarishda asosan ikki turdagi texnologiyalar qo'llaniladi: (i) gaz fazasidan kimyoviy cho'ktirish, ya'ni olovli gidroliz orqali olinadigan pirogen SiO_2 (1-rasm) va (ii) suyuq fazada kimyoviy cho'ktirish asosida olinadigan cho'kma SiO_2 [5; 6; 7]. Pirogen texnologiya yuqori tozaligi va keng o'ziga xos yuzasi bilan ajralib turadi. Masalan, Evonik Industries (Germaniya) kompaniyasi tomonidan ishlab chiqariladigan "Aerosil®" markasi 5–50 nm diametrli, 300 m^2/g dan ortiq yuzaga ega zarrachalar shaklida olinadi [5]. Biroq bunday usulning kamchiligi juda yuqori energiya sarfi, xavfsizlik talablari yuqori bo'lgan xomashyo (SiCl_4) va murakkab uskuna talab qilinishidir. Shuningdek, jarayonning narxi yuqoriligi sababli, pirogen SiO_2 ko'plab keng ko'lamli texnologik sohalarda, masalan, shinalar sanoatida kam qo'llaniladi.

Cho'kma SiO_2 texnologiyasi nisbatan oddiy va arzonroq bo'lsa-da, uning kamchiliklari ham mavjud: reagent sarfi katta, filtrlash va quritish jarayonlari energiya talabchan, oqova suvlarning tozalanishi esa ekologik muammolarni keltirib chiqaradi [8; 9; 10]. Shu sababli, nanodispers SiO_2 sintezini resurs va energiya tejamkor yo'llar bilan amalga oshirish masalasi dolzarb bo'lib qolmoqda.

So'nggi yillarda olimlar turli qayta tiklanadigan va ikkilamchi xomashyo manbalaridan foydalanishga katta e'tibor qaratmoqdalar. Guruch po'stlog'i [11; 12; 13], bambuk barglari [14], palma yog'i chiqindilari [14] va "Missiya o'ti" kabi o'simliklar [16], shuningdek, metallurgiya shlaklari [17], fosforli o'g'itlar ishlab

chiqarish mahsulotlari [17] va alyuminiy ftoridi chiqindilari [19] asosida amorf SiO_2 sintez qilish bo'yicha ko'plab ilmiy ishlanmalar mavjud. Bunday usullar ekologik tozaligi va xomashyo arzonligi bilan afzalliklarga ega. Biroq ularning natijalari har doim ham sanoat talablariga javob bermaydi: ko'pincha zarrachalarning o'lcham taqsimoti keng, tozalik darajasi past 94–96%, ajralish darajasi esa 20–40% bilan cheklanadi [20]. Shu sababli, yangi samarali usullarni ishlab chiqish zarurati mavjud.

1-jadval.

Guruch po'stlog'idan sintez qilingan SiO_2 ning rentgenofluoressent tahlil natijalari [13].

Element	SiO ₂	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Cl	TiO ₂	L.O.I	La&Lu
Ulushi %	94,5	0,39	0,36	0,66	1,1	0,17	0,01	2,05	<1

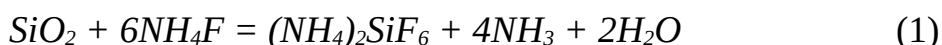
Ushbu sharoitda ftorammoniy usuli yuqori dispersli amorf SiO_2 ni sintez qilishning istiqbolli yo'nalishi sifatida alohida e'tiborga loyiqdir. Mazkur texnologiya NH_4F asosida olib boriladi va bir qator afzalliklarga ega. Avvalo, jarayon 400 °C dan past haroratlarda amalga oshirilishi bilan energiya tejamliligini ta'minlanadi, bu ko'plab alternativ usullarga nisbatan sezilarli ustunlik beradi. Shuningdek, NH_4F ning qayta tiklanishi imkoniyati texnologik yopiq siklni yaratib, chiqindisiz ishlab chiqarishni tashkil etishga imkon beradi. Ftorammoniy usulining yana bir muhim jihati xomashyo manbalarining kengligidir: tabiiy kvarts qumlari bilan bir qatorda texnogen chiqindilar, jumladan mis eritish shlaklari va boshqa metallurgik mahsulotlardan ham samarali foydalanish mumkin. Natijada, bu texnologiya chiqindilarni utilizatsiya qilish va qayta ishlashning qulay yo'lini taqdim etadi. Adabiyotlarda keltirilgan ma'lumotlarga ko'ra, ushbu usul orqali olingan SiO_2 ning tozaligi 99,9 % gacha yetishi va ajralish darajasi 98 % atrofida bo'lishi uning yuqori sifat ko'rsatkichlariga ega ekanini tasdiqlaydi.

Ftorammoniy usuli nafaqat yuqori sifatli nanodispers SiO_2 olish imkonini beradi, balki ekologik va iqtisodiy jihatdan ham samarali texnologiya sifatida ajralib turadi. Uskunalar murakkab emas, xavfsizlik talablari pastroq, jarayon chiqindisiz amalga oshishi mumkin. Shu bois mazkur yo‘nalish fundamental va amaliy tadqiqotlar uchun dolzarb hisoblanadi.

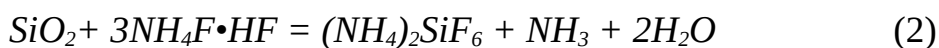
Mazkur maqola ftorammoniy usulida yuqori dispersli amorf SiO_2 sintezining ilmiy-texnologik asoslari, xomashyo tanlovi, jarayon mexanizmi, fizik-kimyoviy xossalari va sanoatga joriy etish istiqbollarini yoritishga bag‘ishlangan.

Tadqiqod metodologiyasi.

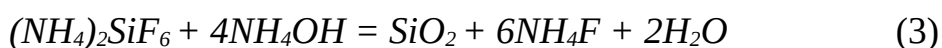
Ushbu usulda asosiy va yagona reaktiv sifatida ftorlovchi reaktiv - ammoniy ftoridi NH_4F , yoki ammoniy biftoridi $\text{NH}_4 \cdot \text{HF}_2$ qo‘llaniladi. Xomashyoni ftorlash 50 dan 200 °C gacha bo‘lgan haroratda amalga oshiriladi. Ammoniy ftoridining miqdori stexiometriya bo‘yicha shunday tanlanadiki, u SiO_2 ni parchalanishi uchun yetarli bo‘ladi va boshqa oksidlar bilan reaksiyaga kirishishga ulgurmaydi. Ammoniy ftoridining eritmalari SiO_2 bilan samarali o‘zaro ta’sir qiladi va natijada geksaflosilikat ammoniy - GFSA - $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ hosil bo‘ladi, quyidagi reaksiya bo‘yicha:



Ammoniy biftoridi kremniy oksidi bilan quyidagi reaksiya bo‘yicha o‘zaro ta’sir qiladi:



Hosil bo‘lgan GFSA $((\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6)$ normal sharoitda qattiq kristall modda bo‘lib, qizdirilganda parchalanmasdan sublimatsiya bo‘ladi va 320 °C dan yuqori haroratda u to‘liq gaz fazasiga o‘tadi. $(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$ suvda yaxshi eriydi, ammiak eritmasidagi eruvchanligi 70 °C da 370 g/l ga etadi. Ammiak bilan o‘zaro ta’sir qilganda u gidrolizlanadi va SiO_2 ko‘rinishida cho‘kadi, quyidagi reaksiya bo‘yicha:

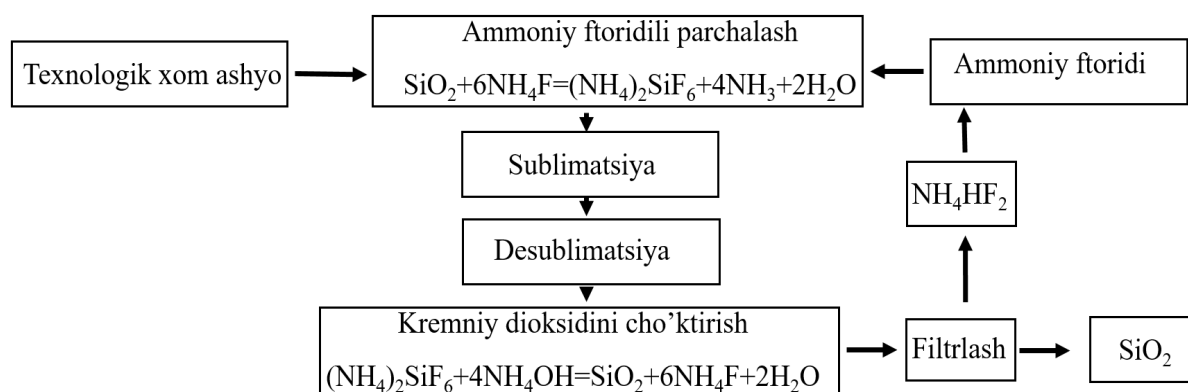


Ushbu ftoridlardan bizning dissertatsiya tadqiqotimizda shlaklardan SiO₂ ni ajratish uchun ishlatilgan. Keyinchalik, ammiak eritmasidan filtrlash orqali ajratilgan SiO₂ yuqori dispersli kukun shaklida quritiladi.

Kremniy oksidini filtratsiya orqali ajratgandan so'ng, ammoniy ftoridi eritmasi qoladi, uni bug'latish jarayonida NH₄F ammoniy biftoridi shaklida kristallanadi, quyidagi reaksiya bo'yicha:



Shunday qilib, reaktiv yangi partiya SiO₂ sintezi uchun texnologik jarayon boshiga qaytariladi. NH₄F asosiy reaktivini qayta tiklash imkoniyati yuqori dispersli SiO₂ kukunlarini sintez qilishning ftorid usulining muhim afzalligi hisoblanadi.



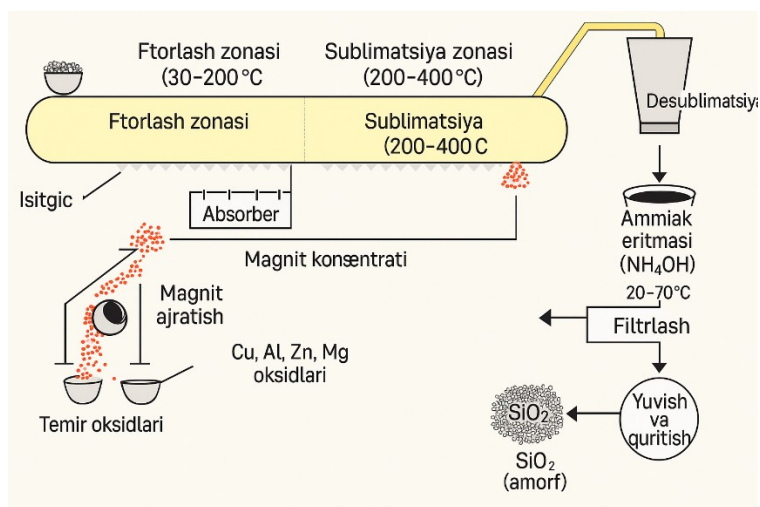
3-rasm. Ftorid usuli bo'yicha yuqori dispersli SiO₂ kukunlarini sintez qilish sxemasi.

Yuqorida keltirilgan sxema bo'yicha olingan yuqori dispers SiO₂ quritiladi, bundan so'ng tayyor mahsulotga aylanadi. Ammoniy ftoridini qayta tiklash imkoniyati yuqori dispersli kremniy oksidining uzluksiz sintez siklini tashkil qilishga imkon beradi.

Tahlillar va natijalar

Yuqori dispersli amorf SiO₂ ni sintez qilish yuqorida keltirilgan 1–3-reaksiyalarni amalga oshirishga mo'ljallangan uskunada bajarildi. Xomashyo 1,0 mm dan kichik fraksiyagacha maydalanib, stoxiometriya bo'yicha boshlang'ich xomashyoning kimyoviy tarkibidagi SiO₂ ga nisbatan 1:3,7 ammoniy ftorid -

NH_4F aralashtirildi; hosil bo'lgan aralashma yuklash bunkeriga uzatildi. Jarayonning sxematik ketma-ketligi 4-rasmda keltirilgan.



4-rasm. Ftorid texnologiyasi asosida yuqori dispersli amorf SiO_2 sintez qilish jarayonining sxematik tasviri.

Stoxiometrik tayyorlangan aralashma birinchi bosqichda qo'zg'almas pech bo'shlig'iga uzatiladi. Bu yerda vintli aralashtirgich past tezlikda uzluksiz aralashtirib turadi, isitgich esa aralashmani 200 °C gacha qizdirib, xomashyoning ftorlanishini to'liq yakunlaydi. Truba bo'ylab ko'rish oynalari orqali qizdirish va harakatlanish holati real vaqtda vizual nazorat qilindi. Hosil bo'layotgan gazlar, ya'ni H_2O bug'lari, NH_3 va h.k. absorberga yo'naltiruvchi kollektorlardan chiqarib olindi. Absorberda H_2O va NH_3 ning to'liq yutilishi aralashmaning namligini kamaytirib, uning reologiyasini pasaytirdi va massa almashinuvini yaxshiladi.

Ftorlanish tugagach, massani statsionar zonadan aylanuvchi pechga uzatish uchun pech oxiridagi qopqoq dastasi ochilib, aralashma tuynuk orqali ikkinchi zonaga tushirildi. Aylanuvchi pech bo'ylab 200 → 400 °C harorat gradientini bosqichma-bosqich oshirish natijasida gaz fazasiga o'tuvchi geksoftorsilikatammoniy ($(\text{NH}_4)_2\text{SiF}_6$, quyida GFSA) intensiv sublimatsiyalanadi va desublimatorga kiradi. Desublimatorida markaziy suv-sovitkich yordamida bug'lar kondensatsiyalanib, chiqishda oq kristall GFSA kukuni olinadi. Tajribalarda GFSA chiqishi ~95 % ga teng. Mass-spektrometriyada aniqlangan metall aralashmalar juda past: mass. % — Al 0,002; Fe 0,003; Ni 0,003.

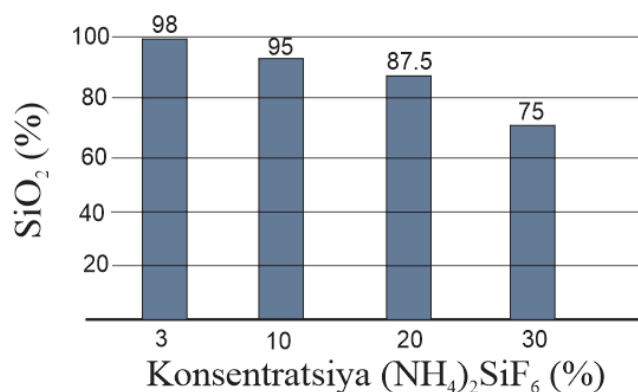
GFSA ning ammiakli gidrolizi va SiO_2 ni cho'ktirish jarayoni ikkinchi asosiy bosqichda amalga oshirildi. Bunda GFSA 10–25 mass.% li ammiakli suvda $\text{pH} = 8\text{--}9$ va $25\text{ }^\circ\text{C}$ harorat sharoitida gidroliz qilinib, amorf SiO_2 cho'ktirildi. Parametrlarning tanlanishi ilmiy asoslangan bo'lib, ammiak konsentratsiyasi <10 mass.% bo'lganda gel-massa haddan tashqari qalinlashib, filtrlash jarayonini qiyinlashtirishi kuzatildi. Aksincha, 25 mass.% konsentratsiyada mahsulot chiqimi pasayib, texnologiyaning umumiy iqtisodiy samaradorligiga salbiy ta'sir ko'rsatishi aniqlandi.

Filtrlashdan so'ng mass-spektrometriya ma'lumotlariga ko'ra 99,97 % tozalikka ega yuqori dispersli amorf SiO_2 kukuni olindi.

Gidroliz samaradorligiga ammiak konsentratsiyasi va ta'sir davomiyligi sezilarli ta'sir ko'rsatadi. Eng yuqori konversiya va barqaror filtrlanish 20 mass. % NH_3 va $\geq 0,5$ soat sharoitida qayd etildi. Bundan tashqari, filtrlangandan keyin suspenziyani distillangan suv bilan mexanik aralashtirib yuvish va doimiy og'irlikka qadar quritish zarrachalar sifati va umumiy chiqimga ijobiy ta'sir ko'rsatdi.

GFSA konsentratsiyasining hosil bo'lish samaradorligiga ta'sirining gidroliz eritmasidagi konsentratsiya 3, 10, 20 va 30 mass. % darajalarda o'rganildi ($T = 25\text{ }^\circ\text{C}$). SiO_2 ni ajratib olish darajasi 5-rasmda keltirilgan.

Natijalar shuni ko'rsatdiki, eng yuqori chiqim $\sim 98\%$ 3 mass. % GFSA da kuzatiladi; konsentratsiya 30 mass. % gacha oshirilganda chiqim $\sim 75\%$ gacha kamayadi. Demak, eritmadagi GFSA ni 10 baravar oshirish SiO_2 chiqimini $\sim 25\%$ ga pasaytiradi. Buning sababi sifatida yuqori tuz konsentratsiyasida ion kuchi oshishi, gel strukturasiining zichlashuvi, kolloid barqarorlikning buzilishi va mass-transport cheklanishlari tufayli o'sayotgan zarrachalarning birikishi va filtrlash-yuvish samaradorligining pasayishi keltiriladi.



5-rasm. GFSA ning turli konsentratsiyalarida ammiak eritmasida gidroliz qilishda SiO₂ ni ajratib olish darajasi.

Yakuniy mahsulot sifatini va tarkibiy tahlil natijalarini ko'rsatkichlar bilan baholash natijasida quyidagi natijalarga erishildi: sintez qilingan SiO₂ ning kimyoviy tozaligi 99,97 mass.% ni tashkil etdi, umumiy ajralib chiqish darajasi qariyb 98 % ga teng bo'ldi, GFSA bosqichida esa mahsulot chiqimi 95 % atrofida qayd etildi.

Ushbu ko'rsatkichlarga quyidagi texnologik yechimlar hisobiga erishildi: (i) statsionar pechda gazlarni samarali chiqarish, qatlam reologiyasini optimallashtirish; (ii) sublimatsiya zonasi uchun vizual nazorat va harorat gradientini (200 → 400 °C) sekin-asta oshirib boshqarish; (iii) GFSA bug'larini desublimatsiya qilishda markaziy suv-sovitkichdan foydalanish; (iv) cho'ktirilgan SiO₂ ni ko'p bosqichli yuvish va doimiy og'irlikka qadar quritish orqali qoldiq GFSA va namlikni minimallashtirish.

Sintez qilingan SiO₂ ning kimyoviy tozaligi ISP mass-spektrometrida tasdiqlandi; natijalar 2-jadvalda keltirilgan.

2-jadval

Sintez qilingan SiO₂ ning kimyoviy tarkibi tahlili. mass. %.

SiO ₂	Fe	Al	K	Ca	Cu	Zn	Mg
99,97	0,014	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001

2-jadvaldan ko'rinadiki, metall aralashmalar 10⁻³–10⁻² mass. % darajasida bo'lib, optik-elektronika, adsorbsiya va kompozit polimerlar uchun qo'yiladigan

talablarni qondiradi. Past Fe va Al miqdori rang beruvchi markazlarning paydo bo'lish ehtimolini kamaytiradi, K va Ca ning iz miqdorlari esa g'ovaklik-sirt kimyosini boshqarilgan modifikatsiya orqali ham bartaraf etilishi mumkin.

Jarayon parametrlari va mahsulot xossalari o'rtasidagi bog'liqlik tajribalar orqali aniqlandi. Harorat profilining 200 dan 400 °C gacha bosqichma-bosqich oshirilishi GFSA ning to'liq sublimatsiyasini ta'minlab, trubalar devorida kondensatsiya yo'qotishlarini kamaytirdi va kristall o'sishini nazorat qilish imkonini berdi. Eritmaning pH qiymati 8–9 oralig'ida saqlanganda silikat polikondensatsiyasi jarayonida Si–O–Si bog'lanishlari barqaror shakllandi hamda kolloid barqarorlik optimal darajada bo'ldi. Ammiak konsentratsiyasi 10–25 mass. % diapazonida bo'lganda gelning reologiyasi va filtrlanish tezligi o'rtasida muvozanat ta'minlandi; konsentratsiya 10 % dan past bo'lganda gel massasi haddan tashqari zichlashib, filtrlanish qiyinlashdi, 25 % dan yuqorida esa mahsulot chiqimi sezilarli darajada pasaydi. Shuningdek, GFSA konsentratsiyasi 3 % atrofida maksimal ajralish darajasini berdi, ammo konsentratsiya ortishi bilan eritmadagi ion kuchi kuchayib, zarrachalarning agregatsiyasi kuchaydi va natijada filtrlanish samaradorligi pasaydi (qarang 5-rasm).

Texnologik samaradorlik va sanoat joriy etish imkoniyatiga oid olingan natijalar ftorammoniy usulining bir qator amaliy ustunliklarini tasdiqlaydi. Avvalo, jarayon barcha bosqichlarda 400 °C dan past haroratlarda amalga oshirilgani sababli energiya tejamkorligi yuqori darajada ta'minlanadi. Bundan tashqari, GFSA bosqichida taxminan 95 % va yakuniy mahsulotda 98 % chiqimga erishilishi hamda kimyoviy tozaligining 99,97 % ni tashkil etishi usulning yuqori samaradorligini ko'rsatadi. Jarayon vizual nazorat oynalari va moduliylangan harorat grafigi orqali samarali boshqarilishi mumkinligi ham muhim afzallik hisoblanadi. Shuningdek, NH_4F ning qayta tiklanishi va hosil bo'ladigan gaz-bug' aralashmalarining absorbsiyasi texnologiyaning ekologik xavfsizligini ta'minlaydi.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda ftorammoniy usuli yordamida yuqori dispersli amorf SiO_2 sintezi muvaffaqiyatli amalga oshirildi. Jarayonning nisbatan past haroratlarda ($\leq 400^\circ\text{C}$) olib borilishi uni energiya tejamkor texnologiya sifatida ajratib turadi. Tajribalar natijasida yakuniy mahsulotning chiqimi $\sim 98\%$ ga, kimyoviy tozaligi esa $99,97\%$ ga teng ekani aniqlandi. NH_4F reaktivining yopiq siklda qayta tiklanishi ishlab chiqarishni chiqindisiz tashkil qilish imkonini berdi, bu esa ekologik xavfsizlik va iqtisodiy samaradorlikni ta'minlaydi. Olingan amorf SiO_2 nanozarrachalari tarkibidagi metall aralashmalar darajasi juda past bo'lgani sababli ularni yuqori talab qo'yiladigan sohalarda, jumladan, elektronika, kataliz, tibbiyot, polimer kompozitlari va qurilish materiallarida qo'llash imkoniyati mavjud. Natijalar ftorammoniy usulining ilmiy va amaliy jihatdan istiqbolli texnologiya ekanini tasdiqlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Wang, Y. Bottom-up and top-down approaches to the synthesis of monodispersed spherical colloids of low melting-point metals / Y. Wang, Y. Xia. Nano Letters. 2004. – Vol. 4, Iss. 10. – P. 2047–2050.
2. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – a review / F. Sanchez, K. Sobolev. Construction and Building Materials. – 2010. – Vol. 24, Iss. 11. – P. 2060–2071.
3. Walter D. Primary Particles – Agglomerates – Aggregates. In: Nanomaterials. Boon, 2013. P. 9–24.
4. Saravanan, P. Synthesis and Characterisation of Nanomaterials / P. Saravanan, R. Gopalan, V. Chandrasekaran. Defence Science Journal. – 2008. – V. 58. – No. 4. – P. 504 – 516.
5. Hyde E, Seyfaee A, Neville F and Moreno-Atanasio R. Colloidal Silica Particle Synthesis and Future Industrial Manufacturing Pathways: A Review, Industrial & Engineering Chemistry Research (2016), 55, 8891–8913. [doi:10.1021/acs.iecr.6b01839](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b01839).

6. Кутищева Е.С, Усольцева И.О, Передерин Ю.В. Способы получения высокодисперсного диоксида кремния. Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 188–193.
7. Basic characteristics of Aerosil fumed silica (2014) Tech. Bull.Fine Particles 11, Evonik Industries, Hanau. Aerosil – Fumed Silica, 4th ed. Technical Overview, Evonik Industriesm, Hanau
<http://www.aerosil.com/product/aerosil/en/products/hydrophobic-fumed-silica/Pages/default.aspx>
8. Fathi Habashi. Handbook of Extractive Metallurgy, WILEY-VCH, Heidelberg, Germany, 1984. Vol. 4. P. 584-660. 161 Handbook of Extractive Metallurgy. Edited by Fathi Habashi. WILEY-VCH. Heidelberg, Germany, 1984. Vol. 4. P. 584-660.
9. Music S, Filipovic-Vinceković N and Sekovanic L. Precipitation of amorphous SiO₂ particles and their properties. Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 28, No. 01, pp. 89 - 94, 2011.
10. Бочевская Е.Г., Каршигина З.Б., Саргелова Э.А., Абишева З.С. Осаждение аморфного диоксида кремния из силикатных растворов, полученных после переработки минеральной высококремнистой руды. Вестник науки и образования, 12(36), т. 1., 2017, стр. 18-23.
11. Dhaneswara D, Fatriansyah J.F, Situmorang F.W, Haqoh A.N, 2020. Synthesis of Amorphous Silica from Rice Husk Ash: Comparing HCl and CH₃COOH Acidification Methods and Various Alkaline Concentrations. *International Journal of Technology*. Volume 11(1), pp. 200-208.
12. Aharipour N, Nemati A, Malek Khachatourian A. “Green Synthesis of Silica Extracted from Rice Husk Ash”, *Advanced Ceramics Progress*, Vol. 8, No. 4, (2022), 15-20. <https://doi.org/10.30501/acp.2022.363265.1103>
13. Zarei V, Mirzaasadi M, Davarpanah A, Nasiri A, Valizadeh M, Hosseini M.J.S. Environmental Method for Synthesizing Amorphous Silica Oxide Nanoparticles from a Natural Material. *Processes*, 2021, 9, 334. <https://doi.org/10.3390/pr9020334>

14. Sharma, P, Kherb, J, Prakash, J et al. A novel and facile green synthesis of SiO₂ nanoparticles for removal of toxic water pollutants. Appl Nanosci. 13, 735–747 (2023). <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01898-1>.
15. Utama P.S, Yamsaengsung R and Sangwichien Ch. Production and characterization of precipitated silica from palm oil mill fly ash using CO₂ impregnation and mechanical fragmentation Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2019, Vol. 36, No. 01, pp. 523 – 530. [dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20170458](https://doi.org/10.1590/0104-6632.20190361s20170458).
16. Thayyullathil A, Naseera C.M, Liyakath F.M, Vydhehi E.K, Sheeja S.R, Naduparambath S. Effect of Temperature and Method of Synthesis on Morphology and Phase Transition of Amorphous and Crystalline Nano Silica Extracted from Mission Grass (Pennisetum Polystachion). Silicon, 2024, p.3493 <https://doi.org/10.1007/s12633-024-02932-x>
17. Wang Q, Li Zh, Li D and et.al. Method of High-quality Silica Preparation from Copper Smelting Slag, JOM, Vol. 72, No. 7, 2020, p. 2676-2685 <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04196-3>.
18. Abburi A, Ali M, Moriya P.V. Synthesis of mesoporous silica nanoparticles from waste hexafluorosilicic acid of fertilizer industry. J Mater. Res. Technol. 2020, 9(4), pp. 8074–8080. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.055/>
19. 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 Al₂O₃-SiO₂ Catalyst Supports. Catalysts 2022, 12, 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>
20. Setyawan N et. al., Synthesis of silica from rice husk by sol-gel method, 2021, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 733, 012149, [doi:10.1088/1755-1315/733/1/012149](https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012149)