Сведения об авторах

Алихан Алибекович Ахметов* – докторант образовательной программы 8D05302- «Техническая физика» кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Михаил Вячеславович Ермоленко – к.т.н., ассоциированный профессор, старший преподаватель кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Авторлар туралы мәліметтер

Алихан Алибекович Ахметов* – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының 8D05302 – «Техникалық физика» білім беру бағдарламасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Михаил Вячеславович Ермоленко – техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, профессор, «Техникалық физика және жылу энергетикасы» кафедрасының меңгерушісі, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Information about the authors

Alikhan Alibekuly Akhmetov* – PhD Student of the Educational Program 8D05302 – Technical Physics, Department of «Technical Physics and Thermal Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: akhmetov_alikhan@bk.ru.

Mikhail Vyacheslavovich Yermolenko – Candidate of Technical Sciences, associate professor, senior teacher of the department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: tehfiz@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1677-8023.

Olga Aleksandrovna Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of «Technical Physics and Heat Power Engineering», Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5221-1772.

Поступила в редакцию 29.06.2026
Поступила после доработки 20.08.2026
Принята к публикации 21.08.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-66

BY 4.0
Check for updates

ҒТАХР: 29.19.21

Т. Тусеев[1], А.А. Куйкабаева[1]*, Э.М. Зульбухарова[1], А.К. Данлыбаева[1], Қ.М. Омаров[2]
[1]Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ. әл-Фараби даңғылы, 71
[2]Әскери бөлім 18292,
2050008, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Байзақов көшесі, 275 а
*e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

КРЕМНИЙ ДИОКСИДІНІҢ (SiO_2) ГИДРОКСИЛ ҚАБАТЫНА ɣ-СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІ

Аңдатпа: *Жұмыста γ-сәулеленудің кремний диоксидінің адсорбциялық қасиеттеріне әсері зерттелді. SiO_2 бетінде оттегінің гамма-адсорбциясының спектралдық және температуралық тәуелділіктері анықталды, сәулеленудің гидроксилдік қабат күйіне ықпалы қарастырылды, парамагниттік және адсорбциялық орталықтар арасындағы өзара байланыс айқындалды, сондай-ақ радиациялық адсорбциядағы қоспалардың рөлі белгіленді. Вакуумда жүргізілген γ-сәулелену ИҚ-спектрдің түрін өзгертеді: оқшауланған және сутекпен байланысқан гидроксил топтарының (3750,*

©Т. Тусеев, А.А. Куйкабаева, Э.М. Зульбухарова, А.К. Данлыбаева, Қ.М. Омаров, 2026

3605 см⁻¹) интенсивтілігі азаяды, су молекуласының деформациялық тербеліс аймағында жаңа жолақтар (1555, 1520, 1380 см⁻¹) пайда болады. γ-кванттарымен сәулеленген SiO_2-ге (сәулелену дозасы 24 кГрей) оттегі жіберілгенде 3750 см⁻¹ жолақтың интенсивтілігі төмендейді. Сонымен қатар жұтылу максимумының аз жиіліктер жағына бірнеше см⁻¹-ге ығысуы байқалады.

Зерттеулер нәтижесінде γ-сәулеленген SiO_2-нің ИҚ-спектрлерін талдау барысында мынадай құбылыстар анықталды: γ-сәулелену әсерінен дегидро қышқылдандыру және дегидрлеу процестері жүреді. Сонымен қатар, оттегінің γ-адсорбциясы кезінде басқа адсорбция түрлерімен қатар қалдық органиканың радиолизі жүріп, нәтижесінде әртүрлі формиаттәрізді қосылыстар мен су түзіледі.

SiO_2 бетінің алдын ала активтендірілуі 200, 400, 600 және 800°С температураларда жүргізілді. Адсорбциялық сыйымдылықтың температуралық тәуелділігі 400–600 °С аралығында минимумға ие екендігі байқалды. Алдын ала прокалка температурасы артқан сайын γ-адсорбция жылдамдығы да, жалпы адсорбцияланған оттегінің мөлшері де өседі. Бұл температураларда ИҚ-спектроскопия деректері бойынша гидроксил топтарының бұзылуы жүреді.

Термодесорбциялық зерттеулер газ бөліну жылдамдығының максимумдары 100–120 °С және 200-400 °С аралығында байқалатынын көрсетті. Бұл бірнеше типті адсорбция орталықтарының бар екендігін дәлелдейді: бірінші максимум әдетте Н-орталықтарға, ал екіншісі координациялық орталықтарға сәйкес келеді.

ЭПР-спектрдің дозалық тәуелділігі белгілі заңдылыққа бағынады: сигнал формасы өзгермей, олардың интенсивтілігі доза артқан сайын ұлғаяды.

Алдын ала γ-сәулеленген SiO_2 бетінде оттегінің адсорбциясы парамагниттік орталықтардың санын арттырады, бұл оттегінің радикалды формада да адсорбцияланатынын көрсетеді.

Парамагниттік орталықтардың температуралық тәуелділігі айқын максимумға ие – шамамен 400 °С-та байқалады. 120 °С -ге дейінгі температураларда парамагниттік орталықтар іс жүзінде жойылмайды. Ал 240 °С температурада олар толықтай күйдіруге ұшырап, жоғалады. Бұл деректер SiO_2 бетінде әртүрлі типтегі адсорбциялық орталықтардың бар екенін және олардың тұрақтылығы температураға тәуелді екенін дәлелдейді.

Түйін сөздер: адсорбция, γ-сәулелену, спектрлік тәуелділік, температуралық тәуелділік, катализдік процесс.

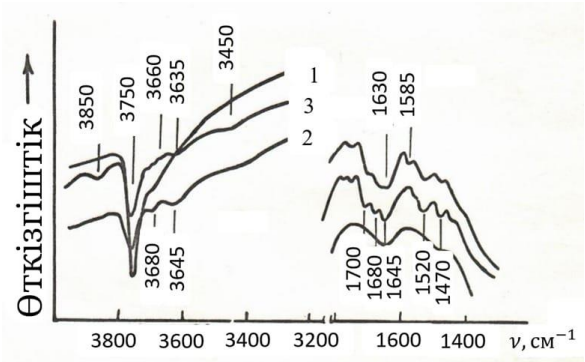
Кіріспе

Адсорбция беткі электрондық процестерге елеулі ықпал ететіндіктен қатты дене бетінде радиациялық-физикалық құбылыстарды зерттегенде, γ-сәулелену әсерінен жүретін адсорбциялық үрдістер маңызды рөл атқарады. Сәулелену жағдайындағы адсорбция мен оның салдарын зерттеу радиациялық ақаулардың түзілу механизмін және олардың адсорбциялық әрі катализдік процестердегі қатысуын түсінуге мүмкіндік береді. Бұл беттік және көлемдік ақаулардың рөлін, сондай-ақ белсенді орталықтардың табиғатын анықтауға жол ашады [1-3].

Тәжірибелік бөлім. Зерттеу нысандары ретінде кремний диоксидінің түрлері пайдаланылды: ICI (ірі кеуекті ірі силикагель), зертханалық жағдайда синтезделген аса таза «04» қоспасыз силикагель және аэросилдер [4]. Үлгілерге вакуумдық-термиялық өңдеу жүргізу және гамма-адсорбцияны зерттеу үшін қолданылған қондырғы цеолит-көмір адсорбциялық сорғылардан, диффузиялық сорғыдан, салқындатқыш тұзақтардан және қыздырылатын майсыз жоғары вакуумды ысырмадан құралған екі параллельді сорғылау тармағынан тұрады. Гамма-адсорбцияға арналған тәжірибелерде адсорбент – газ жүйесіндегі қысым өлшеулері адсорбат ретінде қолданылған газ бойынша алдын ала градирленген манометрлердің көмегімен жүргізілді. Жүйедегі температура хромель-алюмель, хромель-копель және платина-платинородий термопарларының көмегімен өлшенді. Зерттеуге пайдаланылған газдар негізінен сутек пен оттегі болды. γ-кванттарының көзі ретінде орталық арнасындағы дозалық қуаты 200 рад/сек сәулелену көзі – радиоактивті 60Co изотобының препараты болатын гамма-қондырғы қолданылды. Жұмыста жиіліктерінің аумағы 5000-400 см⁻¹ болатын «Karl Zeiss Jena» фирмасының UR-20c типті ИҚ-спектрометрі қолданылды. ЭПР (электрондық парамагниттік резонанс) әдісі арқылы гамма-кванттарымен сәулелену дозасының шамасына және алдын ала өңдеу температурасына байланысты сәулелендірілген кремний диоксидіндегі радиациялық ақаулар зерттелді [4]. Сәулелендіру алдында кремний диоксиді бірнеше сағат бойы термо-вакуумдық өңдеуден өткізілді. Үлгілер сәулелендірер алдында 6-8 сағат ауада қыздырылып, сонша уақыт вакуумда 400°С температурада күйдірілді.

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау

1-суреттен көрініп тұрғандай, вакуумда γ-сәулелендіру спектр түрін өзгертеді: оқшауланған және сутекпен байланысқан гидроксил топтарының (3750, 3605 $см^{-1}$) интенсивтілігі азаяды, ал су молекулаларының деформациялық тербелістері аймағында жаңа жолақтар (1555, 1520, 1380 $см^{-1}$) пайда болады.

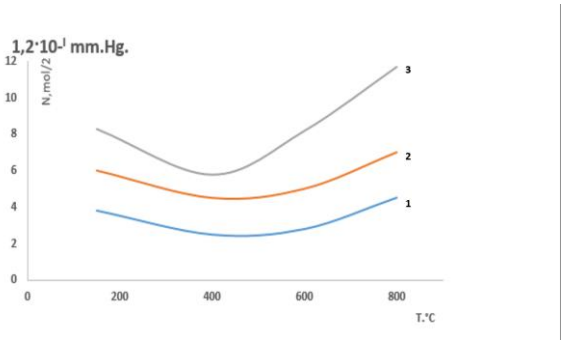


1 – шығыс спектр ($Т_к$ =400^0 С), 2 – 2,4 Мрад, 3 – O_2 жіберу

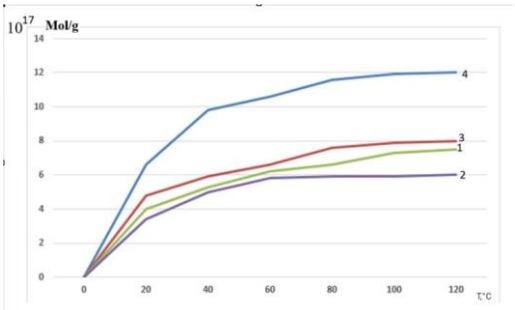
Сурет 1 – γ -сәулеленген двуокись кремнидің ИҚ спектрлері

Сәулелену дозасы 2,4 Мрад болатын γ-кванттарымен сәулелендірілген SiO_2-ге оттегін жіберу 3750 $см^{-1}$ жолағының интенсивтілігінің азаюына алып келеді. Сонымен қатар, жұтылу максимумының бірнеше $см^{-1}$-ге (төмен жиіліктер жағына қарай) ығысуы байқалады. Осылайша, γ-сәулелендірілген SiO_2 үлгілерінің ИҚ-спектрлерін зерттеу нәтижесінде γ-сәулеленудің әсерінен дегидроксилдену және дегидратация процестері жүретіні анықталды. SiO_2 бетінің алдын ала температуралық белсендендірудің маңыздылығын анықтау үшін 200, 400, 600 және 800 °С температуралары таңдалды.

Алынған эксперименттік мәліметтер 2-6-суреттерде келтірілген. 2-суреттен көрініп тұрғандай, SiO_2 адсорбциялық сыйымдылығының температураға тәуелділігі 400-600 °С күйдіру аймағында минимумға ие.



Сурет 2 – алдын ала күйдіру температурасына байланысты γ-адсорбцияланған оттегі мөлшерінің тәуелділігі: Dγ = 2,4 (1,3) және 18,6 (2) Мрад, P_0 = 7·10^{-2} (1,2) және 1,2·10^{-1} (3) мм. сын. бағ.



1 – $Т_к$=200, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800°С (Dγ= 2,4 Мрад)

Сурет 3 – кремний диоксидіндегі гамма-адсорбцияның кинетикасы

350-500°С аралығында алдын ала өңдеу температурасы артқанда адсорбциялық қабілеттің өсетіні [4] еңбегінде, SiO_2 бетінде γ- және радиациялық адсорбцияны зерттеу барысында байқалған. Алдын ала өңдеу температурасы артқан сайын каталитикалық белсенділіктің жоғарылауы [5] еңбегінде атап өтілген. Оттегінің гамма-адсорбциясы кезінде алдын ала өңдеу температурасының 600-800°С-қа дейін жоғарылауы SiO_2-тің O_2-ге қатысты адсорбциялық сыйымдылығының артуына әкелетін құбылыс байқалады. Оттек реакциясының өнімдері сутектік байланыс түзе алатын беткі гидроксил топтарынан бөлек, радикалды орталықтардың да бар екенін болжамдауға болады (5-сурет). Қоспалық орталықтардың рөлін де жоққа шығаруға болмайды, алайда олар алдын ала өңдеу температурасына тәуелді емес сияқты, сондықтан бұл жерде олар қарастырылмайды [6].

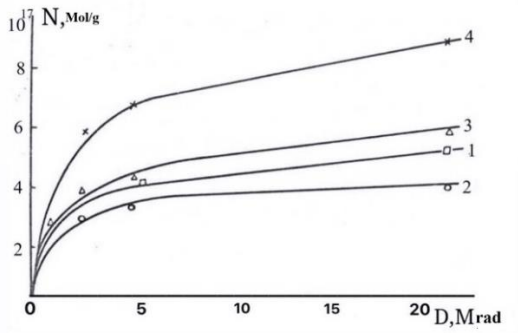
Болжам бойынша, 200°С температурада өңдеу кезінде негізгі рөлді қалдық органикалық ластаушы заттардың тотығуы атқарады; бұл температурада органика толық күйіп бітпейді, ал сәулелендіру кезінде радиолиз және органикалық бөлшектердің бетке қарай диффузиясы орын алуы мүмкін. Алдын ала өңдеу температурасы 200°С болған жағдайда біз келесі адсорбция орталықтарын ескере аламыз: 1) беткі гидроксилдік орталықтар, 2) радикалды орталықтар және 3) қоспалық орталықтар. Жоғарыда аталған орталықтардағы адсорбциядан бөлек, оттегі ішінара тотығу процестеріне де жұмсалуы мүмкін.

Алдын ала 400°С температурада күйдірілген кезде адсорбция минималды деңгейде болады, бұл күтпеген нәтиже болып көрінеді. Бұл жағдайда тотығу процестері маңызды рөл атқармайды [7].

SiO_2-ті алдын ала күйдірудің алдыңғы температурасына қарағанда оттегінің адсорбцияланған молекулалары санының азаюы, болжам бойынша, 200°С температурада тотығу процестерінің елеулі үлесімен түсіндіріледі. Өйткені 400°С кезінде координациялық байланысқан судың жойылуына байланысты радикалды орталықтардың түзілу процесі жеңілдейді, яғни радикалды орталықтар саны артуы байқалады (5-сурет). Алдын ала күйдіру температурасы артқан сайын гамма-адсорбция жылдамдығы да, сондай-ақ жалпы адсорбцияланған оттегі мөлшері де өседі.

Бұл эффектті түсіндіру үшін γ-сәулелендіру кезінде адсорбентте белсенді адсорбция орталықтарының түзілу сызбасын келесідей деп болжауға болады: күйдіру температурасы артқан сайын SiO_2 бетінде силоксан көпірлерінің саны артады, олар оттегінің қатысуымен тиімді байланыс түзе алады. γ-сәулелену байланыстарды үзбей бүкіл кешенді қозған күйге келтіреді. Алдын ала өңдеу температурасы өзгерген кезде SiO_2 бетінде оттегінің γ-адсорбциясының дозалық тәуелділігі (4-сурет) айтарлықтай өзгерістерге ұшырамайды.

Сапалық тұрғыдан алғанда, барлық температуралар үшін сәулелену дозасы артқан сайын адсорбцияланған зат мөлшері өседі [8]. Күйдіру температурасы артқан сайын (бұл әсіресе 800 °С температурада айқын байқалады) қанығу үлкен дозаларда жүзеге асады. Егер 400°С температурада қанықтыру шамамен 10 Мрад дозада жүрсе, 600°С және 800°С температурада осы дозалар аймағында сіңірілген газ мөлшерінің жоғарылауы байқалады. Басқаша айтқанда, температура жоғарылаған сайын радиацияның шығымы да артады.

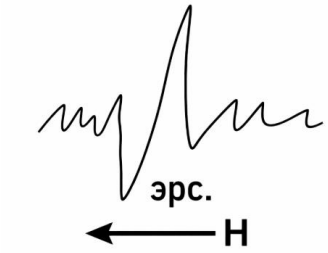


1 – $T_к$=200, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800°С (P_o=7.10^{-2} мм.сын.бағ.)

Сурет 4 – SiO_2 бетінде O_2-нің γ-адсорбциясының дозалық тәуелділігі

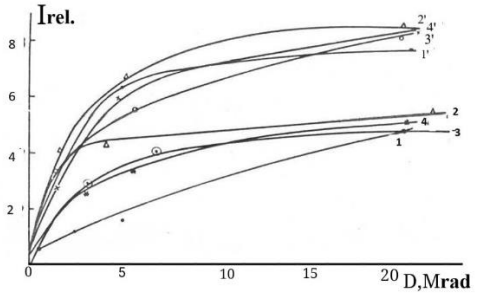
γ – сәулелендірілген SiO_2-тің ЭПР спектрлері (5-сурет) кем дегенде 5 немесе 6 сызықтан тұрады, және 6-сызық 1 Мрад-тан жоғары дозаларда пайда болып, дозамен пропорционалды түрде интенсивтілігі артады. SiO_2-тің ЭПР спектріндегі барлық

компоненттердің дозалық тәуелділігі бірдей заңдылыққа бағынады: олардың интенсивтілігі доза артқан сайын өседі, сигналдың формасы өзгермей сақталады [9].



Сурет 5 – γ -сәулелендірілген SiO_2 ЭПР спектрі. (D = 18,6 Мрад)

SiO_2 ЭПР спектрінің температуралық және дозалық тәуелділігі, сондай-ақ оған оттегінің адсорбциясының әсері 6-суретте көрсетілген. Бұл тәжірибелерде (Т > 400°С) үлгілер алдын ала кварц ампулаларында сыналды, содан кейін вакуумды бұзбай, шыны ампулаларға ауыстырылып бөлме температурасында сәулелендірілді. Оттегін жіберу белгілі көлемдегі ампулаға жүзеге асырылды.



1 – Т = 200, 2 – 400, 3 – 600, 4 – 800°С, 1' - 4' – 0_2 шығарғаннан кейінгі (P_O=I,2'I0 мм. сын.бағ.)

Сурет 6 – SiO_2-дегі парамагниттік орталықтардың дозаға тәуелділігі

Температураға тәуелділікті зерттеу нәтижесінде парамагниттік орталықтардың (ПМО) ең жоғары концентрациясы алдын ала күйдіру температурасы 400-600°С аралығында байқалатыны анықталды. Дәл осы температурада γ-сәулелендірілген SiO_2 үлгілерінің адсорбциялық белсенділігі ең төмен деңгейде болады.

Қорытынды

1. Кремний диоксиді бетіндегі гамма-адсорбциялық құбылыстарды зерттеу кезінде адсорбция жылдамдығы мен адсорбцияланған газдың мөлшері, парамагниттік орталықтардың концентрациясы (γ-сәулелену кезінде) үлгінің алдын ала қыздыру температурасына байланысты екендігі анықталды. γ-адсорбциялық белсенділіктің минимумы Т = 800°С және Т = 400°С температураларда байқалады [10].
2. γ-сәулелермен сәулелендіру оксидтердің беткі гидроксил топтарының бұзылуына әкеледі. Бұл кезде су мен сутегі молекулалары бөлінеді. Судың десорбциясы 400°С дейінгі күйдіру температурасында жүреді, ал сутегінің десорбциясы 400 °С-тан жоғары температурада жүзеге асады. Сусыздандыру және дегидроксилдену кремний диоксиді бетінде шиеленісті силоксан көпірлерін пайда тудырады.
3. Гамма-сәулелермен сәулелену кезінде кремний диоксидінде электронды және тесік қасиеттері бар парамагниттік орталықтар пайда болады. ЭПР (электронды парамагниттік резонанс) сигналдарының максималды қарқындылығы 400°С алдын ала өңдеу температурасында байқалады.

Әдебиеттер тізімі

1. Bondarenko G.G. Radiatsionnaya fizika, struktura i prochnost' tverdykh tel: uchebnoe posobie / G.G. Bondarenko. – 3-e izd. – M. : Laboratoriya znanii, 2024. – 465 s. (in Russian).
2. Impact of Gamma-Ray Radiation on SiO_2 Hydroxyl Cover / T. Tusseyev et al // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3020, iss. 1. – Art. 030009. https://doi.org/10.1063/5.0193755.

3. Meng D. Gamma-ray irradiation-induced oxidation and disproportionation at the amorphous SiO_2/Si interfaces / D. Meng, M. Lan, Z. Yang // Journal of Materials Chemistry C. – 2020. – Vol. 8, № 47. – P. 17065-17073. https://doi.org/10.1039/D0TC03942J.
4. Polymerization, grafting and adsorption in the presence of inorganic substrates: thermal polymerization of styrene with untreated and γ-irradiated silica gel as a case study / F. D'Acunzo et al // Polymer. – 2013. – Vol. 54, iss. 25. – P. 6695-6701. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.10.044.
5. Performance degradation mechanism of γ-ray irradiated sol-gel silica film / B. Li et al // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2023. – Vol. 622. – Art. 122666. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122666.
6. The effect of γ-ray radiation on surface physicochemical processes on Al_2O_3 / T.T. Tusseyev et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2025. – Vol. 2984. – Art. 012021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2984/1/012021.
7. Sn/SnO_2/MWCNT composite anode and electrochemical impedance spectroscopy studies for Li-ion batteries / M. Alaf et al // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. – 2016. – Vol. 24, № 10. – P. 630-634. https://doi.org/10.1080/1536383X.2016.1221403.
8. Radtsig V.A. Hydrogenation of the silanone groups $(\equiv Si–O)_2Si=O$: experimental and quantum-chemical studies / V.A. Radtsig, I.N. Senchenya // Russian Chemical Bulletin. – 1996. – Vol. 45, № 8. – P. 1849-1856. https://doi.org/10.1007/BF01457762.
9. Li C. Radiation stability of SiO_2 micro- and nanopowders under electron and proton exposure / C. Li, M.M. Mikhailov, V.V. Neshchimenko // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2014. – Vol. 319. – P. 123–127. https://doi.org/10.1016/j.nimb.2013.11.007.
10. Radiation-stimulated adsorption processes on the surface of beryllium oxide / T.T. Tusseyev et al // Chimica Techno Acta. – 2022. – Vol. 9, № 1. – Art. 20229106. – P. 1-5. https://doi.org/10.15826/chimtech.2022.9.1.06.

T. Tusseyev[1], A. Kuykabaeva[*], A. Danlybaeva[1], E. Zulbukharova[1], K. Omarov[2]
Al-Farabi Kazakh National University,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, Al-Farabi Avenue, 71
[2]Military Unit 18292
2050008, Republic of Kazakhstan, Almaty city, Baizakov Street, 275a
[*]e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

THE EFFECT OF γ IRRADIATION ON THE HYDROXYL LAYER OF SILICON DIOXIDE (SiO_2)

The study investigated the effect of γ-irradiation on the adsorption properties of silicon dioxide. Spectral and temperature dependencies of gamma-adsorption of oxygen on SiO2 were determined, the influence of irradiation on the state of the hydroxyl layer was examined, the correlation between paramagnetic and adsorption centers was revealed, and the role of impurities in radiation adsorption was established.

γ-irradiation in vacuum changes the appearance of the IR spectrum: the intensity of isolated and hydrogen-bonded hydroxyl groups (3750, 3605 cm^{-1}) decreases, while new bands (1555, 1520, 1380 cm^{-1}) appear in the region of water deformation vibrations. Introducing oxygen onto γ-irradiated SiO2 (irradiation dose 24 kGy) causes a decrease in the intensity of the 3750 cm^{-1} band. At the same time, a slight shift of the absorption maximum toward lower frequencies by several cm^{-1} is observed.

In the study of IR spectra of γ-irradiated SiO2, it was established that γ-irradiation induces processes of dehydroxylation and dehydration. During γ-adsorption of oxygen, along with other forms of adsorption, radiolysis of residual organic matter occurs, resulting in the formation of various formate-like compounds as well as water.

Preliminary activation of the SiO_2 surface was carried out at temperatures of 200, 400, 600 and 800°C. The temperature dependence of the adsorption capacity of SiO2 shows a minimum in the calcination range of 400-600°C. With increasing preliminary calcination temperature, both the rate of gamma-adsorption and the total amount of adsorbed oxygen increase. At these temperatures, IR spectroscopy data indicate the destruction of hydroxyl groups.

Thermodesorption studies reveal that maxima in gas release rates are observed at 100-120°C and 200-400°C, indicating the presence of several types of adsorption centers. The first maximum is usually attributed to H-centers, while the second corresponds to coordination centers.

The dose dependence of the EPR spectrum of SiO2 follows a regular pattern: the intensities increase with rising dose while the signal shape remains unchanged.

Oxygen adsorption on pre-irradiated SiO2 increases the number of paramagnetic centers, which provides grounds to conclude that oxygen adsorption also occurs in a radical form.

The temperature dependence of paramagnetic centers shows a pronounced maximum at 400°C. Up to 120°C, the paramagnetic centers on SiO2 are almost not annealed. At 240°C, however, the paramagnetic centers are completely annealed. This behavior highlights the thermal stability range of different adsorption-related centers and confirms the radical nature of oxygen interaction with γ-irradiated silica.

Key words: *adsorption, γ irradiation, spectral dependence, temperature dependence, catalytic process.*

Т. Тусеев[1], А.А. Куйкабаева[*], А.К. Данлыбаева[1], Э.М. Зульбухарова[1], К.М. Омаров[2]
[1]Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
050040, Республика Казахстан, Алматы, проспект аль-Фараби, 71
Воинская часть 18292, 2050008, Республика Казахстан, Алматы, улица Байзакова, 275 а
*e-mail: a.kuikabaeva1@gmail.com

ВЛИЯНИЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГИДРОКСИЛЬНЫЙ СЛОЙ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ (SiO_2)

В работе проведены исследования влияния γ-излучения адсорбционные свойства диоксида кремния. Определены спектральные и температурные зависимости гамма-адсорбции кислорода на SiO_2, изучено влияние облучения на состояние гидроксильного слоя, выявлена взаимосвязь между парамагнитными и адсорбционными центрами, а также установлена роль примесей в радиационной адсорбции. γ-облучение в вакууме изменяет вид ИК-спектра: уменьшается интенсивность изолированных и водородно-связанных гидроксильных групп (3750, 3605 $см^{-1}$), появляются новые полосы (1555, 1520, 1380 $см^{-1}$) в области деформационных колебаний воды. Напуск кислорода на облученный γ-квантами SiO_2 (доза облучения 24 КГрей) вызывает уменьшение интенсивности полосы 3750 $см^{-1}$. Одновременно происходит некоторое смещение максимума поглощения (в сторону малых частот) на несколько см $^{-1}$.

При исследовании ИК-спектров γ-облученных SiO_2 установлено, что под воздействием γ-облучения происходит процесс дегидроксилирования и дегидратации, при γ-адсорбции кислорода наряду с другими формами адсорбции идет процесс радиолиза остаточной органики и в результате которой образуются различные формиатподобные соединения, а также вода. Предварительная активация поверхности SiO_2 производилась при температурах: 200, 400, 600 и 800°C. Температурная зависимость адсорбционной емкости $Si0_2$ имеет минимум в области прокалки 400 - 600°C. С увеличением температуры предварительной прокалки возрастает и скорость гамма-адсорбции и, вместе с тем, общее количество адсорбированного кислорода. При этих температурах, по данным ИК-спектроскопии, происходит разрушение гидроксильных групп. Термодесорбционные исследования показывают, что максимумы скоростей газовыделения наблюдаются при температурах 100-120°C и 200-400°C, что говорит о наличии нескольких типов центров адсорбции. Первый максимум обычно приписывается Н-центрам, второй – координационным. Дозовая зависимость ЭПР-спектра SiO_2 подчиняется закономерности: их интенсивности увеличиваются с ростом дозы при неизменной форме сигнала.

*Адсорбция кислорода на предварительно облученной SiO_2 увеличивает число парамагнитных центров**,** что даёт основание говорить об адсорбции кислорода и в радикальной форме. Температурная зависимость парамагнитных центров имеет ярковыраженный максимум при 400°C. Парамагнитные центры на SiO_2 до 120°C почти не отжигаются. При температуре 240°C парамагнитные центры полностью отжигаются.*

Ключевые слова: *адсорбция, γ-излучение, спектральная зависимость, температурная зависимость, катализный процесс.*

Авторлар туралы мәліметтер

Тугара Тусеев – ф.-м.ғ.д., Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің доценті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: turgaratus@mail.ru.

Айжан Амангалиевна Куйкабаева* – PhD, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің доценті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: a.kuikabaeva@gmail.com.

Актолқын Кентаевна Данлыбаева – аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: daniybaeva@gmail.com.

Эльмира Мукановна Зульбухарова – аға оқытушы, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, жылу физикасы және техникалық физика кафедрасы; e-mail: Zulbuharova@mail.ru.

Қуандық Мейрамгалиевич Омаров – магистр, Әскери бөлім 18292; e-mail: omar_kyandyk84@mail.ru.

Сведения об авторах

Тугара Тусеев – д.ф.-м.н., профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail:turgaratus@mail.ru.

Айжан Амангалиевна Куйкабаева* – PhD, доцент Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: a.kuikabaeva@gmail.com.

Актолкын Кентаевна Данлыбаева – к.ф.-м.н., старший преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: ospan.doszhanov56@mail.ru.

Эльмира Мукановна Зульбухарова – старший преподаватель, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, кафедра теплофизики и технической физики; e-mail: Zulbuharova@mail.ru.

Куандык Мейрамгалиевич Омаров – магистр, Воинская часть 18292; e-mail: omar_kyandyk84@mail.ru.

Information about the authors

Turgara Tusseyev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: turgaratus@mail.ru.

Aizhan Amangalievna Kuykabayeva* – PhD, Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: a.kuikabaeva@gmail.com.

Aktolkyn Kentaevna Danlybayeva – Candidat of Physical and Mathematical Sciences, Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: daniybaeva@gmail.com.

Elmira Zulbukharova – Senior teacher, Al-Farabi Kazakh National University, Faculty of Physics and Technology, Departament of Thermophysics and Technical Physics; e-mail: Zulbuharova@mail.ru.

Kuandyk Meiramgalievich Omarov – Master's degree, Military Unit 18292; e-mail: omar_kyandyk84@mail.ru.

Редакцияға енуі 30.03.2026
Өңдеуден кейін түсуі 11.06.2026
Жариялауға қабылданды 12.06.2026

https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-67

МРНТИ: 29.15.3, 58.35.09

CC BY 4.0
Check for updates

А.К. Мухамедиев*, И.В. Прозорова, А.А. Прозоров, А.С. Акаев
Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10
*e-mail: mukhamediev@nnc.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ ОЯТ БН-350 ПРИ РАЗРУШЕНИИ ВНУТРЕННИХ КОНСТРУКЦИЙ КОНТЕЙНЕРА ХРАНЕНИЯ

Аннотация: *Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения радиационной безопасности при длительном хранении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора БН-350, отличающегося сложным изотопным составом и высоким уровнем остаточной активности. Цель работы – оценка радиационной обстановки при повреждении защитных и внутренних конструктивных элементов контейнера хранения ОЯТ в различных аварийных сценариях.*

В работе использованы методы трёхмерного моделирования с помощью метода Монте-Карло, а также сценарный анализ разрушений контейнера, включая локальное разрушение стенок и внутренних элементов, перераспределение топлива и осыпание топливных таблеток. Расчёты

©А.К. Мухамедиев, И.В. Прозорова, А.А. Прозоров, А.С. Акаев, 2026