

GIDROLIZ SUYUQLIGIDAN LIGNINNI AJRATIB OLISH VA UNI SULFOLASH JARAYONINI TADQIQ QILISH

Fotima Iskandar qizi Xolmatova^{1,*}, Husniddin Nurboboyevich Rahimov¹, Hasan Irgashevich Qodirov², Eldor Ergashvoy o'g'li Mashae¹, Shoyunus Botir o'g'li Obidov¹, O'tkirbek Rashidovich Azamatov¹¹ Toshkent kimyo-texnologiya instituti, "Neft va gazni qayta ishlash kimyoviy texnologiyasi" kafedrası, Toshkent, O'zbekiston² Toshkent kimyo-texnologiya instituti, "Asosiy organik sintez" kafedrası, Toshkent, O'zbekiston

* Corresponding author: xolmatovafotima93@gmail.com

ARTICLE INFO

Dates:

Received: 15.09.2026

Revised: 27.09.2026

Accepted: 30.09.2026

DOI:

10.66960/jof.3093-8899.00040

Copyright:

CC BY 4.0

ANNOTATSIYA

Maqolada gidroliz suyuqligi tarkibidan ligninni kislotali cho'ktirish usulida ajratib olish va olingan ligninni sulfolash jarayoni o'rganilgan. Gidroliz suyuqligi dastlab 50–200 mkm polipropilen filtdan o'tkazilib, 80–90 °C haroratda 2–4 soat qizdirilgan. Ligninni cho'ktirish uchun suyuqlikning pH qiymati kontsentrangan H₂SO₄ qo'shish orqali 1,8–2,2 gacha pasaytirilgan. Kislotali cho'ktirish natijasida 60–80 daqiqada ligninning taxminan 97 % qismi cho'kmaga o'tishi aniqlangan. Olingan ligninning IQ-spektrida 2929 va 2853 sm⁻¹ da alifatik C–H, 1593,20 sm⁻¹ da aromatik C=C, 1076,28 va 1037,70 sm⁻¹ da C–O hamda 896,90–692,44 sm⁻¹ diapazonda aromatik halqa C–H tebranishlari qayd etilgan. Keyingi bosqichda ligninni sulfolash va ligninsulfokislota hosil bo'lishiga oid jarayonlar hamda IQ-spektr ko'rsatkichlari tahlil qilingan.

Kalit so'zlar: gidroliz suyuqligi, lignin, kislotali cho'ktirish, sulfat kislota, pH, IQ-spektr, sulfolash, ligninsulfokislota.

АННОТАЦИЯ

В статье исследовано выделение лигнина из гидролизной жидкости методом кислотного осаждения и процесс сульфирования полученного лигнина. Гидролизную жидкость предварительно пропустили через полипропиленовый фильтр размером 50–200 мкм и нагревали при 80–90 °C в течение 2–4 ч. Для осаждения лигнина значение pH жидкости снижали до 1,8–2,2 добавлением концентрированной H₂SO₄. В результате кислотного осаждения установлено, что в течение 60–80 мин осажается около 97 % лигнина. В ИК-спектре выделенного лигнина зарегистрированы валентные колебания алифатических C–H при 2929 и 2853 см⁻¹, ароматических C=C при 1593,20 см⁻¹, C–O при 1076,28 и 1037,70 см⁻¹, а также колебания C–H ароматического кольца в диапазоне 896,90–692,44 см⁻¹. На следующем этапе проанализированы процессы сульфирования лигнина и образования лигносульфоновой кислоты, а также соответствующие показатели ИК-спектров.

Ключевые слова: гидролизная жидкость, лигнин, кислотное осаждение, серная кислота, pH, ИК-спектр, сульфирование, лигносульфоновая кислота.

ABSTRACT

The article studies the separation of lignin from hydrolysis liquor by acid precipitation and the sulfonation process of the obtained lignin. The hydrolysis liquor was first passed through a 50–200 μm polypropylene filter and heated at 80–90 °C for 2–4 h. For lignin precipitation, the pH of the liquid was reduced to 1.8–2.2 by adding concentrated H₂SO₄. As a result of acid precipitation, approximately 97% of the lignin was precipitated within 60–80 min. The IR spectrum of the obtained lignin showed aliphatic C–H vibrations at 2929 and 2853 cm⁻¹, aromatic C=C vibrations at 1593.20 cm⁻¹, C–O vibrations at 1076.28 and 1037.70 cm⁻¹, and aromatic ring C–H vibrations in the range of 896.90–692.44 cm⁻¹. At the next stage, the processes related to lignin sulfonation and the formation of lignosulfonic acid, as well as the corresponding IR spectral characteristics, were analyzed.

Keywords: hydrolysis liquor, lignin, acid precipitation, sulfuric acid, pH, IR spectrum, sulfonation, lignosulfonic acid.

How to cite:

Xolmatova F.I., Rahimov H.N., Qodirov H.I., Mashae E.E., Obidov Sh.B., Azamatov O.R. (2026). Gidroliz suyuqligidan ligninni ajratib olish va uni sulfolash jarayonini tadqiq qilish. *Journal of Future*, 2(6), 6–9. <https://doi.org/10.66960/jof.3093-8899.00040>

Kirish

Lignin – murakkab tuzilishga ega bo'lgan tabiiy aromatik polimer bo'lib, lignosellyulozali xomashyoni qayta ishlash jarayonlarida muhim tarkibiy qism hisoblanadi. Ligninni ajratib olish usuli va jarayon sharoitlari uning chiqishi, kimyoviy tuzilishi va keyingi qo'llanilishiga sezilarli tasir ko'rsatadi [1]. Ligninni ajratish va uni yuqori qo'shimcha qiymatga ega mahsulotlarga aylantirish biorefineriya kontseptsiyasining muhim yo'nalishlaridan biri sifatida qaraladi. Ajratish sharoitlarining qattiqligi olingan ligninning xususiyatlari va keyingi qayta ishlash imkoniyatlariga tasir qiladi [1, 2]. Sulfitli jarayonlar lignin tuzilishiga sulfon guruhlari kiritish orqali uning suvdagi eruvchanligini oshirish imkonini beradi. SO₂–spirt–suv fraktsiyalashda ligninning sulfatlanishi, demetillanishi va alkoksillanishi kabi o'zgarishlar kuzatilgan [3]. Ligninni kimyoviy modifikatsiya qilishning sulfash usullari uning funktsional xususiyatlarini o'zgartirishga xizmat qiladi. Masalan, kraft ligninini modifikatsiyalashda sulfash reaksiyasi fenolik va alifatik guruhlarda ham kechishi mumkinligi ko'rsatilgan [4]. Engil sharoitda sulfash ham ligninli materiallarning fizik-mexanik xususiyatlariga tasir qilishi mumkin. Ignabargli yog'och pipig'ini natriy sulfit bilan sulfash mexanik fibrillash samaradorligi va hosil bo'lgan materialning bog'lanish qobiliyatini oshirgan [5].

Zamonaviy tadqiqotlarda ligninni in-situ sulfash ham o'rganilmoqda. Terekni yumshoq organik erituvchi bilan qayta ishlashda lignin tuzilishiga sulfon kislotali guruhlari kiritilishi qayd etilgan [6]. Sulfitli oldindan ishlov berishda ligninning qisman erishi va sulfatlanishi lignosellyulozali materiallarning keyingi fermentativ gidroliziga tasir qiluvchi

omillardan biri ekani ko'rsatilgan [7]. Neft-gaz va neftni qayta ishlash sanoatida metall jihozlarni korroziyadan himoya qilish uchun organik va kompleksонат asosidagi ingibitorlarni ishlab chiqish muhim yo'nalishlardan biri hisoblanadi. OEDF ishtirokida tetragidroimidazo-[4,5-d]-imidazoldion-2,5 asosida olingan kompozitsiyalar po'latni korroziyadan 90% dan ortiq himoya qilishi aniqlangan [8]. Shuningdek, Zn–NTF–OEDF asosidagi metallokompleks kompozitsiyalar korroziya va mineral tuzlar to'planishiga qarshi ingibitor sifatida tadqiq etilgan [9]. Mineral tuzlar to'planishiga qarshi yangi aromatik diamin asosidagi ingibitorning samaradorligi 92–95% ni tashkil etgan [10]. Aromatik diamin asosidagi ingibitorlarda esa korroziyadan himoya samaradorligi alkil zanjiri uzunligiga bog'liq bo'lib, optimal strukturada 79,8% samaradorlik qayd etilgan [11]. MEE seriyali bis-karbamatlari ham ingibitorlar xususiyatlarini namoyon qilib, MEE-1 past zichlikdagi polietilenning termooksidlanish barqarorligini 2,5–43,2 marta oshirgan [12], MEE-2 esa motor yoqilg'ilarining korroziyon faolligini kamaytirish uchun istiqbolli qo'shimcha sifatida tavsiflangan [13]. Tetragidroimidazo-[4,5-d]-imidazoldion-2,5 asosidagi kompozitsion ingibitorlar esa turli agresiv muhitlarda 90% dan yuqori himoya samaradorligini namoyon qilgan [14]. Shu nuqtai nazardan, gidroliz suyuqligidan ligninni kislotali cho'ktirish orqali ajratib olish va keyin uni sulfolash jarayonini o'rganish lignin asosidagi funktsional mahsulotlarni olish uchun amaliy ahamiyatga ega.

Materiallar va metodlar

Tadqiqotda gidroliz suyuqligi, 40 % H_2SO_4 va lignin asosidagi materiallardan foydalanildi. Gidroliz suyuqligi 50–200 mkm polipropilen filtr orqali dastlabki tozalandi va 80–90 °C da 2–4 soat qizdirildi. pH qiymati o'lanib, konsentrlangan H_2SO_4 ni aralashtirish sharoitida qo'shish orqali pH 1,8–2,2 gacha tushirildi. Cho'kma filtrlandi, suv bilan yuvildi va quritildi. Ligninning kimyoviy tuzilishi IQ-spektroskopiya usulida, Shimadzu spektrometrida tahlil qilindi. Ligninsulfokislota hosil bo'lishi bilan bog'liq o'zgarishlar ham IQ-spektrlar orqali baholandi. Jarayonning asosiy texnologik parametrlari: kislota qo'shish tezligi 5–10 ml/l daqiqa, aralashtirish tezligi 400–500 ayl/daqiqa, tasir vaqti 10–30 daqiqa va harorat 40–80 °C.

Natijalar va muhokama. Gidroliz suyuqligi - bu poya tarkibidan tsellyulozani ajratib olish uchun ishqoriy gidrolizlash jarayonida hosil bo'ladigan suyuq faza bo'lib, tarkibida lignin, monosaxaridlar, organik kislotalar va boshqa moddalar mavjud bo'ladi. Ligninni bu suyuqlikdan ajratib olish uchun turli usullar qo'llaniladi. Tadqiqotlarda kislotali cho'ktirish usuli (pH pasaytirish)dan foydalanilgan. Bu usul ligninni gidroliz suyuqligidan ajratishning eng keng tarqalgan usullaridan biri bo'lib, ligninning kislotali muhitda cho'kish xususiyatiga asoslanadi. Gidroliz suyuqligining pH qiymatini pasaytirish orqali ligninni eritmadan ajratib, uni cho'kma shaklida ajratib olinadi. Bunda gidroliz suyuqligining pH qiymatini 1,8-2,2 gacha tushirish kerak. Buning uchun H_2SO_4 (sulfat kislota) yoki HCl (xlorid kislota) ishlatiladi, lignin neytral yoki ishqoriy muhitda eruvchan, lekin kislotali muhitda eritmada erib tura olmaydi va cho'kishni boshlaydi. pH pastlash jarayonida lignin gidrofob xususiyatga ega bo'lib, bir-biriga yig'ilib, agregatlar hosil qiladi. Dastlab gidroliz suyuqligini har xil qo'shimchalar katta o'lchamli qattiq zarrachalar, tolalar, pishmay qolgan poyalardan tozalash maqsadida dastlabki tozalash (mexanik filtrlash) uchun o'lchami 50-200 μm (mikrometr) bo'lgan polipropilen filtdan o'tkazib oldik. So'ngra 80–90 °C da 2–4 soat davomida suyuqlikni qizdirdik, maqsad gidroliz suyuqligida monosaxaridlar va organik kislotalar mavjud bo'lishi mumkin, bu esa ligninni cho'ktirish jarayoniga tasir qiladi. Keyin esa gidroliz suyuqligini pH qiymati o'lchab olindi. Ligninni cho'ktirish jarayonida kislotali muhit hosil qilish muhim bosqich hisoblanadi. Bu jarayonda gidroliz suyuqligini pH 5,5–6,5 dan 1,8–2,2 gacha pasaytirish kerak, bu esa ligninning samarali cho'kishiga yordam beradi. SHuning uchun biz gidroliz suyuqligini pH qiymatini o'lchaganimizdan keyin uni pasaytirish uchun suyuqlikni aralashtirib turgan holda konsentrlangan H_2SO_4 tomchilatib qo'shib turdik.

1-jadval. Kislota qo'shish jarayonining texnik parametrlari

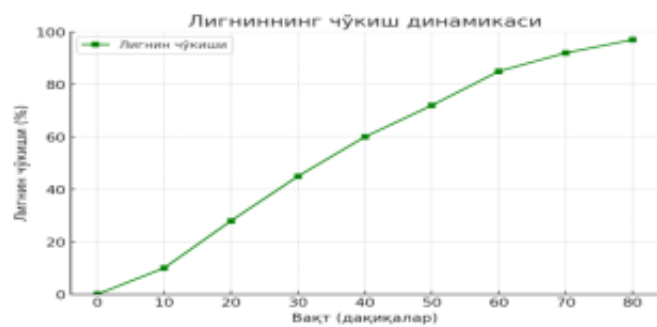
Parametr	Qiymat
Kislota konsentratsiyasi	40% H_2SO_4
Kislota qo'shish tezligi	5–10 ml/l daqiqa
Optimal pH qiymati	1,8–2,2
Ta'sir vaqti (reaksiya vaqti)	10–30 daqiqa
Aralashtirish tezligi	400–500 ayl/daqiqa
Harorat chegarasi	40–80 °C

Jarayonni kuzatib turdik, suyuqlikka kislota qo'shishdan oldin boshlang'ich holatda pH = 6 edi. 10 daqiqadan keyin pH = 5,5-5,3 gacha pasaydi, 15 daqiqa davomida kislotalilik ortib pH = 4,7-4,8 gacha tushdi, keyingi 30 daqiqada davomida kislotalilik yanada ortib pH = 3,5-3,2 gacha tushdi, 40-50 daqiqalarda pH = 2-1,8 gacha tushdi, bu ligninning cho'kishi uchun optimal sharoit hisoblanadi.

Birinchi 10-20 daqiqa ichida ligninning 28% cho'kadi, 30-50 daqiqada cho'kish jarayoni tezlashadi, 72% gacha etadi, 60-80 daqiqalarda ligninning deyarli 97% cho'kadi, yani jarayon yakunlanadi. Jarayon yakunlangandan so'ng ligninni filtrlab olib, suvda yaxshilab yuvdik va quritdik.

Kislotali muhitda gidroliz suyuqligidan cho'ktirib olingan ligninning IQ-spektri (2-rasm, 2-jadval) da keltirilgan.

2-rasm va 2-jadval tahlil natijalariga ko'ra, 2929 cm^{-1} va 2853 cm^{-1} bu diapazon C–H valent tebranishlari (metil va metilen guruh-



1-rasm. Lignin cho'kishining vaqtga bog'liqligi

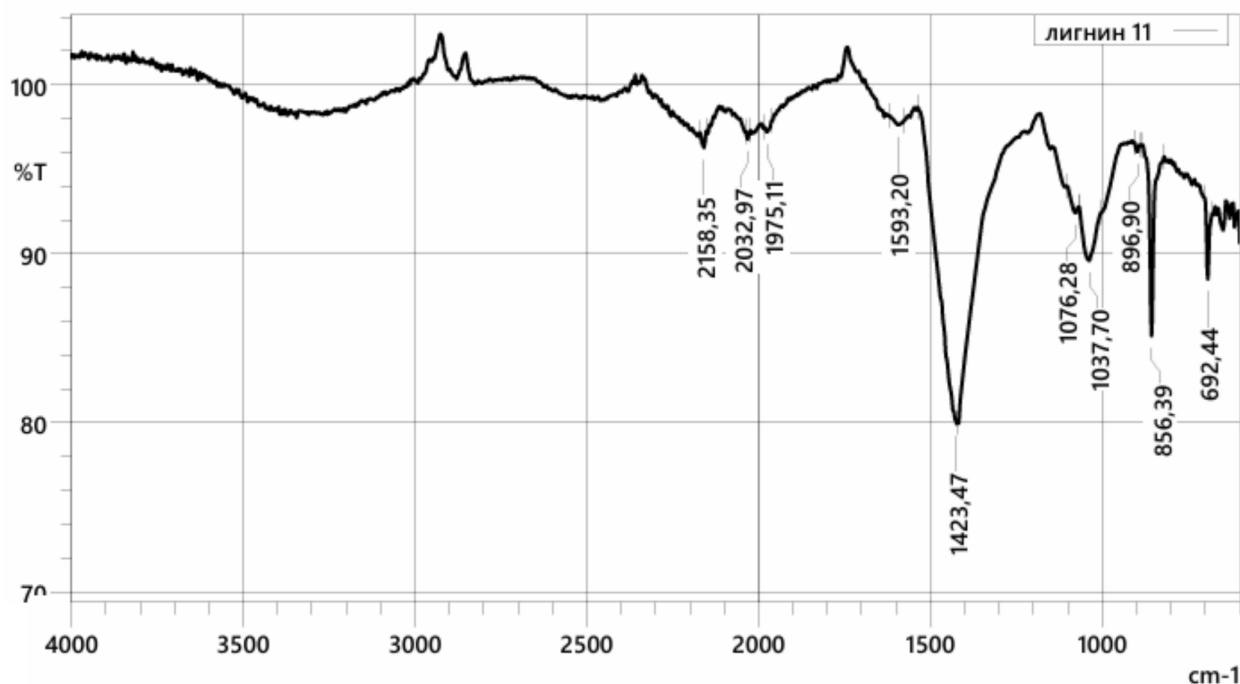
2-jadval. Ligninning IQ-spektri tahlili

Chastota, cm^{-1}	Funksional guruh	Tebranish shakli
2929 va 2853	metil –CH ₃ va metilen –CH ₂ –	Valent
2158,35–1975,1	Aromatik–aromatik	Valent
1593,20	Aromatik yadrodagi C=C	Valent
1423,47	Aromatik yadroga tegishli	Deformatsiya
1076,28–1037,7	Spirt va efirlardagi C–O	Valent
896,90–856,39	Aromatik halqadagi C–H	Valent

lari, –CH₃, –CH₂–) uchun xos. Lignin tarkibidagi alifatik zanjirlardan kelgan signallar. 2158,35 cm^{-1} - 1975,11 cm^{-1} bu joyda kuchli piklar yo'q, lekin ayrim hollarda aromatik–aromatik bog'lar yoki konyugirlangan sistemalar tebranishlari bo'lishi mumkin. 1593,20 cm^{-1} bu aromatik halqadagi C=C valent tebranishlari uchun xos pik. Ligninning asosiy belgilaridan biri, chunki u ko'p sonli aromatik fenilpropan bloklaridan tashkil topgan. 1423,47 cm^{-1} bu C–H deformatsiya tebranishlari va aromatik halqalarga tegishli tebranishlarni ko'rsatadi. 1076,28 cm^{-1} va 1037,70 cm^{-1} bu diapazon C–O valent tebranishlari (spirtlar, efirlar) uchun xos. Ligninning efir bog'lar va polifenol tuzilishini tasdiqlaydi. 896,90 cm^{-1} va 856,39 cm^{-1} bu aromatik halqa C–H tebranishlari (out-of-plane bending) - aromatik sistemaning turini ko'rsatadi. 692,44 cm^{-1} bu ham aromatik halqalarga xos tebranish, ayniqsa ortosubstitutsiyalangan benzol halqalari uchun. Bu IQ-spektr lignin molekulasiga xos bo'lgan tuzilish belgilarini aniq ko'rsatadi: Aromatik halqalar (C=C) - 1593 cm^{-1} pigi bilan tasdiqlangan. Alifatik zanjirlar (C–H) - 2929 va 2853 cm^{-1} diapazonida. Spirt va efir bog'lar (C–O) - 1076 va 1038 cm^{-1} . Aromatik halqalardagi C–H tebranishlari - 896–692 cm^{-1} .

Sulfolignin sintezida turli omillarning ta'siri

Ligninni sulfolash - bu lignin molekulasidagi vodorod atomini sulfo guruhlar (–SO₃H) bilan o'zgartirish jarayoni bo'lib, uning suvda eruvchanligini va reaksiya faolligini oshirish maqsadida amalga oshiriladi. Bu jarayon asosan tsellyuloza-qog'oz sanoati ikkilamchi mahsuloti texnik lignindan foydalanib bajariladi. Ligninning umumiy formulasi (C₉H₁₀O₃)_n, (C₉H₁₂O₅)_n ifodalanadi, lekin bu qiymatlar manbaga qarab o'zgarishi mumkin. Sulfoligninning umumiy formulasi taxminan (C₉H_{10-n}(–SO₃H)_nO₃)_n, (C₉H_{12-n}(–SO₃H)_nO₅)_n kabi bo'lib, rangi uning sulfolanish darajasi va boshlang'ich lignin manbaiga bog'liq. Oddiy holatda sulfoligninning rangi: qo'ng'ir-jigarrangdan to'q qoragacha - bu ligninning tabiiy fenolik tarkibi va reaksiya jarayonidagi o'zgarishlarga bog'liq. Agar sulfolanish samarali bo'lsa va molekula tuzilishidagi fenol guruhlari kamroq oksidlansa – ochiq qo'ng'ir va sarg'ish qahvarang, agar reaksiya sharoiti qattiqroq bo'lsa (masalan, yuqori temperatura yoki kuchli kislotali muhitda) - qora yoki to'q qora rangda bo'ladi. Sulfolignin - bu ligninning sulfolanish hosilasi bo'lib, u ko'pincha tsellyuloza-qog'oz sanoatining ikkilamchi mahsuloti bo'lgan lingosulfonat-lar asosida olinadi. Sulfolignin yuqori qo'shimcha qiymatga ega modda bo'lib, turli sohalarda (adjezivlar, dispergatorlar, burgilash eritmalari) ishlatiladi. Sulfolignin olish uchun lingosulfonatlar (ligninning sulfon kislotalar bilan birikmasi) yoki tozalangan lignin ishlatiladi. Sulfolignin olish jarayoni ligninning sulfonirlanishiga asoslangan bo'lib, bu jarayon asosan kreking, ishqoriy va kislotali muhitda ligninni qayta ishlash orqali amalga oshiriladi. Sulfoligninni sintez qilish jarayonida lignin molekulasiga sulfon



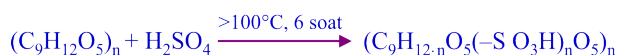
2-rasm. Ligninning IQ-spektri

guruhlari ($-\text{SO}_3\text{H}$) yoki natriy sulfonat ($-\text{SO}_3\text{Na}$) guruhlari biriktiriladi. Bu jarayon kislotali yoki ishqoriy muhitda amalga oshirilishi mumkin.

Kislotali muhitda sulfolash — bu jarayonda konsentratsiyalangan sulfat kislotasi (H_2SO_4) yoki sulfit kislotasi (H_2SO_3) ishlatiladi. Reaksiya mexanizmi: ligninning fenolik guruhlar ($-\text{OH}$) H_2SO_4 tasirida protonlanadi, elektrofilik sulfolash reaksiyasi sodir bo'ladi va $-\text{SO}_3\text{H}$ guruhi lignin molekulasiga biriktiriladi, reaksiya tufayli ligninning suvda eruvchanligi va kimyoviy faolligi ortadi.

Ishqoriy muhitda sulfolash — bu usulda natriy bisulfit (NaHSO_3) yoki natriy sulfit (Na_2SO_3) qo'llaniladi. Ishqoriy muhitda reaksiya osonroq bo'lib, past haroratda amalga oshadi. Lignin molekulasidagi fenolik va benzil alkogol guruhlar ishqoriy muhitda ionlashadi, NaHSO_3 tasirida $-\text{SO}_3\text{Na}$ guruhlar lignin uzilmasiga biriktiriladi, olingan mahsulot lignosulfonatlar bo'lib, ulardan keyingi qayta ishlash jarayonida sulfolignin hosil bo'ladi.

Ligninni sulfolash reaksiyasi:



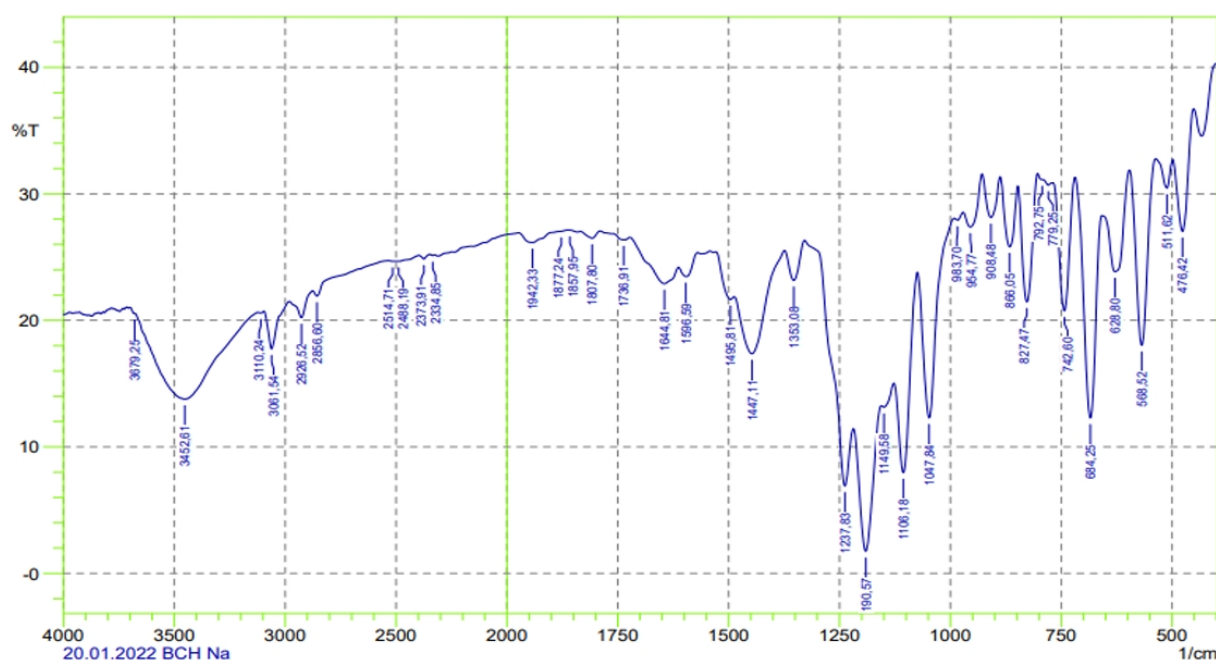
Sulfolashdan keyingi jarayonda lignin molekulari o'zaro bog'lanishi mumkin (krosslinking), bu esa mahsulotning mexanik va termik barqarorligini oshiradi. Bu jarayon katalizatorlar (kislotali yoki metall ionlari) yordamida sodir bo'ladi.

3-jadval. Ligninsulfokislotaning IQ-spektri tahlili

Tebranishlar, cm^{-1}	Funksional guruh	Tebranish shakli
3362,72	Fenol va spirtlardagi $-\text{OH}$	Valent
3062,56	Aromatik yadrodagi $\text{C}-\text{H}$	Valent
1695,54	Kislotali va ketonlardagi $\text{C}=\text{O}$	Valent
1598,67	Aromatik yadrodagi $\text{C}=\text{C}$	Valent
1296,18	$-\text{SO}_3\text{H}$ dagi $\text{S}=\text{O}$	Valent
1194,43	Efirlardagi $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ va $\text{S}-\text{O}$	Valent
745,40	Aromatik yadrodagi $\text{C}-\text{H}$	Valent

Xulosa

Gidroliz suyuqligidan ligninni kislotali cho'ktirish usulida ajratib olish uchun suyuqlikni dastlabki tozalash, qizdirish va pH ni 1,8–2,2 gacha pasaytirish muhim ekani aniqlandi. Tadqiqot sharoitida 60–80 daqiqada ligninning taxminan 97 % qismi cho'kmaga o'tdi. IQ-spektr natijalari olingan lignin tarkibida alifatik $\text{C}-\text{H}$, aromatik $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$ va aromatik halqa $\text{C}-\text{H}$ guruhlariga xos tebranishlar mavjudligini ko'rsatdi. Keyingi bosqichda ligninni sulfolash natijasida suvda eruvchanligi va reaksiyon faolligi yuqori bo'lgan lignosulfonatli mahsulotlar hosil bo'lishi bilan bog'liq o'zgarishlar IQ-spektr ma'lumotlari asosida tahlil qilindi. Olingan natijalar gidroliz suyuqligidan ligninni ajratib olish va uni keyingi kimyoviy modifikatsiyalash jarayonlarini amaliy jihatdan o'rganish imkonini beradi.



3-rasm. Ligninsulfokislolaning IQ-spektri

ADABIYOTLAR RO'YXATI

- [1] Lobato-Peralta D.R., Duque-Brito E., Villafán-Vidales H.I., Longoria A., Sebastian P.J., Cuentas-Gallegos A.K., Arancibia-Bulnes C.A., Okoye P.U. A review on trends in lignin extraction and valorization of lignocellulosic biomass for energy applications // *Journal of Cleaner Production*. — 2021. — Vol. 293. — Article 126123. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126123.
- [2] Sethupathy S., Murillo Morales G., Gao L., Wang H., Yang B., Jiang J., Sun J., Zhu D. Lignin valorization: Status, challenges and opportunities // *Bioresource Technology*. — 2022. — Vol. 347. — Article 126696. — DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126696.
- [3] Sharazi A.M., van Heiningen A.R.P., Sumerskii I., Bacher M. Sugarcane straw lignin obtained by sulfur dioxide-alcohol-water (SAW) fractionation: Effect of solvent // *Industrial Crops and Products*. — 2018. — Vol. 115. — P. 235–242. — DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.02.039.
- [4] Guo Y., Gao W., Fatehi P. Hydroxypropyl sulfonated kraft lignin as a coagulant for cationic dye // *Industrial Crops and Products*. — 2018. — Vol. 124. — P. 273–283. — DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.07.078.
- [5] Ämmälä A., Laitinen O., Sirviö J.A., Liimatainen H. Key role of mild sulfonation of pine sawdust in the production of lignin containing microfibrillated cellulose by ultrafine wet grinding // *Industrial Crops and Products*. — 2019. — Vol. 140. — Article 111664. — DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111664.
- [6] Wu R., Li Y., Wang X., Fu Y., Qin M., Zhang Y. In-situ lignin sulfonation for enhancing enzymatic hydrolysis of poplar using mild organic solvent pretreatment // *Bioresource Technology*. — 2023. — Vol. 369. — Article 128410. — DOI: 10.1016/j.biortech.2022.128410.
- [7] Zhang D.S., Yang Q., Zhu J.Y., Pan X.J. Sulfite (SPORL) pretreatment of switchgrass for enzymatic saccharification // *Bioresource Technology*. — 2013. — Vol. 129. — P. 127–134. — DOI: 10.1016/j.biortech.2012.11.031.
- [8] Obidov Sh.B., Qodirov H.I., Rahimov X.N., Mashaev E.E. Oksitilidendifosfon kislotasi asosidagi korroziya ingibitorlarini olish // *Journal of future*. 2025. Vol. 1. Iss. 1. pp. 22–33. <https://doi.org/10.66960/7ncjhg82>
- [9] Обидов Ш.Б., Қодиров Х.И., Эргашев Ж.Р., Омонов Ш.А. Zn-НТФ+ОЭДФ синтези ва улар асосидаги самарали коррозия ингибиторлари композициялари // *Journal of future*. 2025. Vol. 1. Iss. 1. pp. 42–47. <https://doi.org/10.66960/v5txbf43>
- [10] Davronov S.S., Obidov Sh.B. Mineral tuzlar to'planishiga qarshi samarali ingibitor sintezi va uning neft-gaz sohalarida qo'llanilishi // *Journal of future*. 2026. Vol. 2. Iss. 1. pp. 48–56. <https://doi.org/10.66960/jof.3093-8899.00019>
- [11] Abdullaeva Z.A., Jakhonov F.H., Rakhimov Kh.N. Tailoring alkyl chain length in isoquinolinium-based inhibitors: impact on adsorption behavior and corrosion protection in oil refining systems // *Journal of future*. 2026. Vol. 2. Iss. 1. pp. 57–64. <https://doi.org/10.66960/jof.3093-8899.00020>
- [12] E. Mashaev, A. Makhsumov, A. Khudoyberdiev Study of the synthesis of bis-carbamate of the MEE series and study of brutto inhibitory activity // JSIRU — 2024. — Vol.2, — Issue 1, — pp. 318-324 — <https://doi.org/10.5281/zenodo.10521571>
- [13] Mashaev E., Azamatov U., Makhsumov A., Ismailov B. Synthesis and study of reducing the corrosive activity of motor fuels using additives of the MEE series // *AJEMA* — 2023. — Vol.1, — Issue 10, — pp. 75-78
- [14] Обидов Ш.Б. Рахимов Х.Н. Машаев Э.Э. Кадиров Х.И. Композиционные ингибиторы на основе тетрагидроимидазо-[4,5-d]-имидазолдион-2,5 и их эффективность // *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* — 2024. — 11(128). — С. 48-52 — DOI — 10.32743/UniTech.2024.128.11.18700