DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102

UDK 677.37.021.16:677.494.745

IPAK SANOATI CHIQINDILARIDAN NANOTOLALI MATERIALLAR UCHUN FIBROIN AJRATIB OLISH TEXNOLOGIYASI VA UNING RESURS SALOHIYATI

Mahsudov Sh.A., Qorabayev Sh.A.,
Bobojanov X.T., Boboyev U.A.,
Namangan davlat texnika universiteti,
Bekchanov F.Sh.,
Toshkent Kimyo Xalqaro Universiteti

Annotatsiya. *Maqolada pilla o‘rash va ipak yigirish ishlab chiqarishi chiqindilaridan elektroqoliplash (elektrospinning) usuli uchun xom ashyo bo‘lib xizmat qiluvchi ipak fibroinini ajratib olish texnologiyasi ishlab chiqilgan va asoslangan. Seritsinni chiqarib tashlash uchun 65%li xo‘jalik sovuni (1,5 g/l) va natriy karbonat (2 g/l, ya’ni 0,019 M) asosidagi kuchsiz ishqoriy eritma tanlangan; ishlov berish vanna moduli 40, harorat 100 °C va davomiylik 30 daqiqa bo‘lganda amalga oshirilgan. Tanlangan soda konsentratsiyasi xalqaro amaliyotda keng qo‘llaniladigan 0,02 M li degummajlash protokoliga mos kelishi ko‘rsatilgan. Seritsinning boshlang‘ich miqdori (20–28%) bo‘yicha fibroinning nazariy chiqishi 72–80% deb baholangan. Mamlakat miqyosidagi resurs salohiyati hisob-kitobi ipak chiqindilari ushbu texnologiya uchun cheklovchi omil emasligini, cheklov esa elektroqoliplash jarayonining unumdorligida ekanligini ko‘rsatadi.*

Аннотация. *В статье разработана и обоснована технология выделения фиброина шёлка из отходов кокономотального и шелкопрядильного производства, служащего сырьём для процесса электроформования. Для удаления серицина выбран слабощелочной раствор на основе 65%-ного хозяйственного мыла (1,5 г/л) и кальцинированной соды (2 г/л, то есть 0,019 М) при модуле ванны 40, температуре 100 °C и продолжительности 30 мин. Показано, что выбранная концентрация соды соответствует широко применяемому в мировой практике протоколу дегуммирования 0,02 М. По исходному содержанию серицина (20–28%) теоретический выход фиброина оценён в 72–80%. Расчёт ресурсного потенциала в масштабе страны показывает, что шёлковые отходы не являются лимитирующим фактором данной технологии; ограничение связано с производительностью процесса электроформования.*

Abstract. *The paper develops and substantiates a technology for recovering silk fibroin from cocoon-reeling and silk-spinning waste as a feedstock for electrospinning. A mildly alkaline bath based on 65% laundry soap (1.5 g/l) and sodium carbonate (2 g/l, i.e. 0.019 M) was selected for sericin removal; degumming was carried out at a liquor ratio of 40, 100 °C and 30 min. The selected soda concentration is shown to correspond to the 0.02 M degumming protocol widely used internationally. Based on the initial sericin content (20–28%), the theoretical fibroin yield is estimated at 72–80%. A national-scale resource assessment shows that silk waste is not the limiting factor for this technology; the constraint lies in the productivity of the electrospinning process.*

Kalit so‘zlar: *ipak chiqindilari, fibroin, seritsin, degummajlash, natriy karbonat, ishqoriy gidroliz, elektroqoliplash, resurs salohiyati, qo‘shilgan qiymat.*

Ключевые слова: *отходы шёлка, фиброин, серицин, дегуммирование, кальцинированная сода, щелочной гидролиз, электроформование, ресурсный потенциал, добавленная стоимость.*

Keywords: *silk waste, fibroin, sericin, degumming, sodium carbonate, alkaline hydrolysis, electrospinning, resource potential, value added.*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102

Kirish. Pillachilik va ipak sanoati O‘zbekiston Respublikasi qishloq xo‘jaligi va yengil sanoatining an’anaviy tarmoqlaridan biri hisoblanadi. Shu bilan birga ushbu tarmoqning texnologik jarayonlari nisbatan katta hajmdagi tolali chiqindilar hosil bo‘lishi bilan tavsiflanadi. Mavjud me’yorlarga ko‘ra, O‘zbekistonda 1 kg xom ipak ishlab chiqarish uchun 3–3,2 kg quruq tanlab olingan pilla sarflanadi. Natijada pilla o‘rash korxonalarida har bir kilogramm xom ipakka bir kilogrammdan ortiq turli xil chiqindilar, shu jumladan 0,6 kg dan ortiq miqdorda to‘qqiz turdagi tolali chiqindilar to‘g‘ri keladi [1].

Hozirgi kunda ipak va pilla chiqindilarining asosiy qismi mahalliy tadbirkorlar tomonidan ipak tolasi gilamchasi (tarama) holiga keltirilib, xorijiy mamlakatlarga nisbatan arzon narxlarda eksport qilinmoqda. Bu esa qo‘shilgan qiymatning asosiy ulushi mamlakat tashqarisida shakllanishiga olib keladi. Shu sababli ipak chiqindilarini yuqori qo‘shilgan qiymatli mahsulotlar – biomoslashuvchan polimer materiallar, jumladan nanotolali to‘qilmagan materiallar ishlab chiqarishga jalb etish dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi.

Ipak tolasining asosiy tarkibiy qismi bo‘lgan fibroin – Bombyx mori ipak qurti pillalaridan olinadigan fibrillyar oqsil bo‘lib, uning birlamchi ketma-ketligi asosan glitsin (43%), alanin (30%) va serindan (12%) tashkil topgan [2, 3]. Fibroinning og‘ir zanjiri Gly-Ala-Gly-Ala-Gly-Ser asosiy motividan iborat kristall bloklarni hosil qiladi; aynan vodorod bog‘lanishlari bilan bog‘langan antiparallel β-qatlamlar fibroinning suvda erimasligini va yuqori mexanik mustahkamligini belgilaydi. Fibroin biomoslashuvchan, toksik bo‘lmagan va biologik parchalanish tezligi β-varaqlar ulushi orqali boshqariladigan polimer sifatida to‘qima muhandisligi, yaraga bog‘lash materiallari, dori vositalarini yetkazib berish tizimlari va kosmetologiya uchun eng istiqbolli tola hosil qiluvchi polimerlardan biri deb tan olingan [4, 5].

Biroq ipak tolasi tarkibida fibroin (70%) bilan birga suvda eriydigan yopishqoq oqsil – seritsin (30%) ham mavjud. Seritsin allergen bo‘lib, immun reaksiyasini qo‘zg‘atadi va regenerativ tibbiyotda seritsin bilan ifloslangan ipakdan foydalanishni cheklaydi [5]. Bundan tashqari seritsin fibroin molekulalarini o‘zaro bog‘lab turadi va fibroinning erituvchida erishiga to‘sqinlik qiladi. Shu bois nanotolali materiallar uchun xom ashyo tayyorlashda seritsinni chiqarib tashlash (degummajlash) birlamchi va hal qiluvchi texnologik bosqich hisoblanadi.

Mavjud ilmiy adabiyotlarda degummajlash rejimlari, asosan, yuqori sifatli pilla yoki laboratoriya sharoitidagi toza ipak uchun ishlab chiqilgan. Sanoat chiqindilari esa seritsin miqdorining kengroq oraliqda o‘zgarishi (20–28%), yog‘li moddalar va mexanik aralashmalarning mavjudligi bilan farqlanadi, bu esa rejimni alohida asoslashni talab etadi.

Ishning ilmiy yangiligi shundan iboratki, birinchi marta pilla o‘rash ishlab chiqarishining tolali chiqindilari uchun elektroqoliplash jarayonining xom ashyo talablariga moslashtirilgan kuchsiz ishqoriy degummajlash rejimi asoslangan, uning xalqaro amaliyotdagi standart protokol bilan miqdoriy mosligi ko‘rsatilgan hamda texnologiyaning mamlakat miqyosidagi resurs salohiyati baholangan.

Ishning maqsadi – pilla o‘rash va ipak yigirish ishlab chiqarishi chiqindilaridan elektroqoliplash jarayoni uchun yaroqli fibroin ajratib olish texnologiyasini ishlab chiqish, seritsinni chiqarib tashlash rejimini fizik-kimyoviy jihatdan asoslash va texnologiyaning resurs salohiyatini baholashdan iborat.

Tadqiqot obyekti va usullari. Tadqiqot obyekti sifatida pilla o‘rash ishlab chiqarishining tolali chiqindilari (odonkalar) va seritsin miqdori nisbatan past bo‘lgan ipak namunalari olindi. Fibroin ajratib olish jarayoni ikki bosqichda – dastlabki mexanik tayyorgarlik va kimyoviy degummajlash bosqichlarida amalga oshirildi.

Dastlabki tayyorgarlik bosqichida xom ashyo begona aralashmalardan va g‘umbak qoldiqlaridan tozalandi. Saralash bo‘limida pilla tasmalari bog‘ichlaridan ozod qilinib, diskli pichoqlar yordamida kesish amalga oshirildi. O‘ralmagan qismdan saralangan odonkalar maxsus kamerada 26–32 °C harorat va 75–80% nisbiy namlikda 12–16 soat davomida havo

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102

maseratsiyasiga duchor qilindi, so‘ngra silliq yog‘och barabanli maydalagichlarda (volchoklarda) qayta ishlandi. Ushbu operatsiyalar g‘umbak qobiqlarining asosiy qismini tolali massadan ajratish imkonini beradi.

Seritsinni chiqarib tashlashning uchta asosiy usuli ma’lum: kimyoviy-seritsinning ishqorlar va kislotalarning issiq suvli eritmalarida erish qobiliyatiga asoslangan; biologik-seritsin va yog‘larning mikroorganizmlar ajratadigan fermentlar ta’sirida parchalanishiga asoslangan; kombinatsiyalangan – sovun-soda eritmalarida dastlabki qaynatishni keyinchalik biologik tozalash (maseratsiya) bilan birlashtiruvchi usul. Ularning qiyosiy tavsifi 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Seritsinni chiqarib tashlash usullarining qiyosiy tavsifi

Usul	Odatdagi sharoitlar	Afzalliklari	Cheklovlari
Na2CO3 eritmasida qaynatish	0,02 M Na2CO3, 98–100 °C, 30–60 daq.	seritsinni to‘liq chiqaradi, reproduktiv	uzoq ishlov berishda fibroin destruksiyasi
Sovun-soda eritmasi	sovun 1–2 g/l + Na2CO3 1–3 g/l, 95–100 °C	sirt-faol modda yog‘larni emulsiyalaydi	reagentlar sarfi yuqoriroq
Fermentativ (biologik)	proteaza, 50–60 °C, 1–3 soat	fibroinga eng yumshoq ta’sir	qimmat, jarayon uzoq, nazorat murakkab
Kislotali eritmalar	suyultirilgan kislotalar, 90–100 °C	tez kechadi	fibroin gidrolizi, mustahkamlikning pasayishi

Seritsin tabiatan kislotali bo‘lib, uning eruvchanligi ishqoriy muhitda ortadi: ishqoriy muhitda seritsin makromolekulalaridagi karboksil guruhlar dissotsiatsiyalanadi, oqsil zarrachalarining manfiy zaryadi ortadi va ular o‘zaro itarilib eritmaga o‘tadi; parallel ravishda peptid bog‘lanishlarining qisman gidrolizi sodir bo‘ladi. Shu bilan birga ipak fibroini ham ishqorlarga sezgir: yuqori konsentrlangan eritmalar fibroin peptid bog‘lanishlarining gidroliziga olib keladi va tolaning mexanik xossalarini yomonlashtiradi. Gidroliz darajasi pH omiliga bog‘liq bo‘lib, fibroin uchun xavfsiz oraliq pH = 4…8 ni tashkil etadi. Shuning uchun qaynatish eritmasining ishqoriyligi pH = 9…10 oralig‘ida, ya’ni seritsinni eritish uchun yetarli, ammo fibroinni sezilarli darajada shikastlamaydigan darajada ushlab turilishi talab etiladi.

Keltirilgan mulohazalarga asoslanib, degummajlash uchun 65%li xo‘jalik sovuni va natriy karbonat asosidagi kuchsiz ishqoriy eritma tanlandi (2-jadval). Tanlangan natriy karbonat konsentratsiyasini molyar shaklda ifodalasak (M(Na2CO3) = 105,99 g/mol):

$$c(Na2CO3) = 2,0 / 105,99 = 0,0189 \approx 0,019 \text{ mol/l},$$

bu esa xalqaro amaliyotda Bombyx mori ipagini degummajlash uchun keng qo‘llaniladigan 0,02 M li standart protokolga amalda to‘liq mos keladi [6]. Ushbu moslik tanlangan rejimning empirik emas, balki umumqabul qilingan fizik-kimyoviy asosga ega ekanligini ko‘rsatadi.

2-jadval

Ipak chiqindilarini degummajlash eritmasining tarkibi va rejimi

Ko‘rsatkich	Qiymati	Izoh
65%li xo‘jalik sovuni, g/l	1,5	GOST 30266-2017; sirt-faol komponent
Natriy karbonat (Na2CO3), g/l	2,0 (0,019 M)	GOST 5100-85; ishqoriy muhitni yaratadi
Vanna moduli	40	40 l eritma / 1 kg tola

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102

Harorat, °C	100	suv hammomi
Davomiylik, daqiqa	30	doimiy aralashtirish bilan
Muhit, pH	9…10	nazorat qilinadi
Chayish muhiti	distillangan suv	qattiqligi 4% dan kam
Quritish	doimiy og‘irlikka qadar	namlik nazorati

Seritsinning chiqarib tashlanganligi tolaning yumshoqligi, elementar tolalarga ajratilish qobiliyati va keyingi bosqichda erituvchida to‘liq erishi bo‘yicha baholandi. Ajratib olingan fibroinning texnologik yaroqliligi kaltsiy xlorid, distillangan suv va etil spirtidan iborat erituvchi tizimida 70–80 °C haroratda to‘liq eritish orqali tekshirildi; eritma olti qavat tibbiy doka orqali filtrlandi.

Natijalar. Tanlangan kuchsiz ishqoriy rejimda ishlov berilgan ipak namunalarida seritsinning qoldiq miqdori keyingi eritish bosqichiga to‘sqinlik qilmaydigan darajaga tushirildi. Ishlov berilgan tola yumshoq holatga o‘tdi va alohida elementar tolalarga osongina ajraldi; bu fibroin tolalarini bir-biriga yopishtirib turuvchi seritsin qobig‘ining yemirilganligidan dalolat beradi.

Chiqindilardagi seritsinning boshlang‘ich miqdori (20–28%) bo‘yicha fibroinning nazariy massaviy chiqishi quyidagicha baholanadi:

$$Y = 100 - c(seritsin) = 100 - (20…28) = 72…80\%.$$

Amalda yog‘li moddalar va mexanik aralashmalarning chiqib ketishi hisobiga haqiqiy chiqish ushbu oraliqning quyi chegarasiga yaqinlashadi. Hisob-kitoblarda ehtiyotkor baho sifatida Y = 75% qabul qilindi.

Ishlab chiqilgan texnologiyaning umumiy ketma-ketligi 1-rasmda keltirilgan blok-sxema ko‘rinishida rasmiylashtirildi.

Doimiy og‘irlikka qadar quritilgan fibroin kaltsiy xlorid asosidagi erituvchi tarkibida 70–80 °C haroratda cho‘kma va gel hosil qilmasdan to‘liq eridi. Bu holat degummajlash rejimining to‘g‘ri tanlanganligini va fibroin makromolekulalarining ishqoriy gidroliz natijasida sezilarli darajada shikastlanmaganligini bilvosita tasdiqlaydi, chunki chuqur destruksiyaga uchragan oqsil eritmaning yopishqoqligini keskin pasaytiradi va tola hosil qilish qobiliyatini yo‘qotadi.

Texnologiyaning resurs salohiyatini baholash uchun 1 tonna xom ipak ishlab chiqarishga to‘g‘ri keladigan chiqindilar hajmi asos qilib olindi (3-jadval). Hisob-kitob keyingi bosqichda aniqlangan xom ashyo sarfi me’yoriga – 100 birlik tayyor mahsulotga 1 g fibroin to‘g‘ri kelishiga tayanadi.

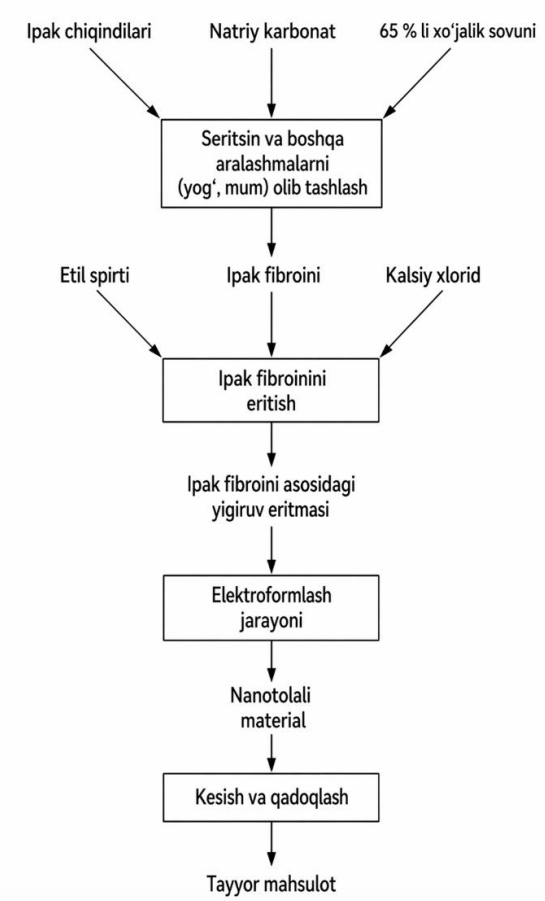
3-jadval

1 tonna xom ipak ishlab chiqarishga to‘g‘ri keladigan fibroin resursi bo‘yicha hisob

Ko‘rsatkich	Hisob ifodasi	Qiymati
Xom ipak ishlab chiqarish	asos	1000 kg
Tolali chiqindilar chiqishi	≥ 0,6 kg / 1 kg xom ipak	≥ 600 kg
Fibroinning nazariy chiqishi	600 × 0,75	≈ 450 kg
Fibroin sarfi me’yori	1 g / 100 birlik	0,01 g / birlik
Nazariy mahsulot hajmi	450 000 g ÷ 0,01 g	$4{,}5 \cdot 10^7$ birlik

Keltirilgan hisob shartli xarakterga ega va faqat xom ashyo bo‘yicha cheklovni baholash uchun xizmat qiladi. Uning natijasi shundan iboratki, mavjud chiqindilar hajmi nanotolali material ishlab chiqarish uchun zarur bo‘lgan fibroin miqdoridan bir necha tartibga ko‘p.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102



1-rasm. Ipak fibroini asosida nanotolali material ishlab chiqarish texnologiyasining blok-sxemasi

Muhokama. Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, fibroin ajratib olish rejimini tanlashda hal qiluvchi omil ishqoriylik darajasidir. Seritsinning erishini ta’minlash uchun ishqoriy muhit zarur bo‘lsa-da, uning konsentratsiyasining ortishi fibroin peptid bog‘lanishlarining gidroliziga olib keladi. Tanlangan 0,019 M Na2CO3 konsentratsiyasining adabiyotlarda keng qo‘llaniladigan 0,02 M protokol bilan mos kelishi tasodifiy emas: ushbu konsentratsiya seritsinni to‘liq eritish uchun yetarli ishqoriylikni ta’minlaydigan, ammo fibroinning molekulyar og‘irligini sezilarli kamaytirmaydigan optimal oraliqqa to‘g‘ri keladi [6, 7].

Natriy karbonat va xo‘jalik sovuni kombinatsiyasining afzalligi vazifalarning taqsimlanishida namoyon bo‘ladi: soda ishqoriy muhitni yaratadi va seritsinning gidrolitik erishini ta’minlaydi, sovun esa sirt-faol modda sifatida yog‘li moddalarni emulsiyalaydi hamda eritmaga o‘tgan seritsinning tola yuzasiga qayta cho‘kishining oldini oladi. Ushbu reagentlar arzon, keng tarqalgan va toksik emas, bu esa texnologiyani sanoatda joriy etish uchun muhim ahamiyatga ega.

Resurs salohiyati hisobining asosiy xulosasi shundan iboratki, ushbu texnologiya uchun ipak chiqindilari cheklovchi omil emas. Tayyor mahsulot tannarxida fibroin ulushi 1% dan kam bo‘lib, bir birlik mahsulotga atigi 0,01 g fibroin sarflanadi. Demak, texnologiyani kengaytirishdagi haqiqiy cheklov elektroqoliplash jarayonining unumdorligi va uskunaning quvvati bilan belgilanadi. Bu xulosa ko‘p emitentli (ko‘p kapillyarli) yigirish boshchalariga o‘tish va yarim sanoat qurilmalaridan foydalanish yo‘nalishini keyingi tadqiqotlarning ustuvor vazifasi sifatida belgilaydi.

Iqtisodiy nuqtai nazardan ipak chiqindilarining o‘rtacha bozor narxi bir kilogramm uchun taxminan 3,50 AQSh dollarini tashkil etadi. Hozirda past narxda eksport qilinayotgan tolali

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102

chiqindilarni mamlakat ichida qayta ishlash orqali qo‘shilgan qiymatni oshirish uchun real texnologik asos mavjud.

Tadqiqotning cheklovlarini alohida ta’kidlash lozim. Birinchidan, seritsinning chiqarib tashlanganligi ushbu ishda bilvosita – tolaning yumshoqligi va erituvchida to‘liq erishi bo‘yicha baholangan. Miqdoriy tasdiqlash uchun degummajlashdagi massa yo‘qotilishini gravimetrik o‘lchash (nazariy 20–28%), infraqizil spektroskopiya yordamida amid I (1600–1700 sm^{-1}), amid II (1500–1600 sm^{-1}) va amid III (1220–1300 sm^{-1}) yutilish polosalarini tahlil qilish hamda tola yuzasining elektron mikroskopik nazorati tavsiya etiladi. Ikkinchidan, ishlab chiqilgan rejim seritsin miqdori nisbatan past bo‘lgan xom ashyo uchun mo‘ljallangan; seritsin miqdori 28% dan yuqori bo‘lgan chiqindilar uchun qaynatish davomiyligini oshirish talab etilishi mumkin, bunda pH ning 10 dan oshib ketishiga yo‘l qo‘ymaslik zarur. Uchinchidan, fibroinning molekulyar og‘irligi va uning degummajlash davomiyligiga bog‘liqligi o‘lchanmagan; bu ko‘rsatkich yigirish eritmasining reologik xossalarini oldindan aytish uchun muhim bo‘lganligi sababli keyingi tadqiqotlar predmeti bo‘lib qoladi.

Xulosa. 1. Pilla o‘rash va ipak yigirish ishlab chiqarishi chiqindilaridan elektroqoliplash jarayoni uchun fibroin ajratib olish texnologiyasi ishlab chiqildi va uning blok-sxemasi rasmiylashtirildi.

2. Degummajlash rejimi fizik-kimyoviy jihatdan asoslandi: 65%li xo‘jalik sovuni 1,5 g/l va natriy karbonat 2,0 g/l (0,019 M), vanna moduli 40, harorat 100 °C, davomiylik 30 daqiqa, muhit pH = 9…10. Tanlangan soda konsentratsiyasi xalqaro amaliyotdagi 0,02 M li standart protokolga mos kelishi ko‘rsatildi.

3. Seritsinning boshlang‘ich miqdori bo‘yicha fibroinning nazariy chiqishi 72–80% deb baholandi; olingan fibroin kaltsiy xlorid asosidagi erituvchi tizimida 70–80 °C haroratda to‘liq eriydi, bu uning elektroqoliplash uchun yaroqliligini tasdiqlaydi.

4. Resurs salohiyati hisobi 1 tonna xom ipak ishlab chiqarishga to‘g‘ri keladigan tolali chiqindilardan ≈450 kg fibroin olish mumkinligini ko‘rsatdi. Xom ashyo ushbu texnologiya uchun cheklovchi omil emas; kengaytirishdagi asosiy cheklov elektroqoliplash jarayonining unumdorligi bilan belgilanadi.

Adabiyotlar ro‘yxati

1. Атаханов А.К., Парпиев Х., Тожимирзаев С.Т. Разработка технологии для получения шёлкового волокна из отходов кокона // Universum: технические науки. – 2021.

2. Vepari C., Kaplan D.L. Silk as a biomaterial // Progress in Polymer Science. – 2007. – Vol. 32, № 8–9. – P. 991–1007.

3. Агапов И.И., Мойсенович М.М., Васильева Т.В. и др. Биодеградируемые матриксы из регенерированного шёлка Bombyx mori // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 433, № 5. – С. 699–702.

4. Zhang X., Reagan M.R., Kaplan D.L. Electrospun silk biomaterial scaffolds for regenerative medicine // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2009. – Vol. 61, № 12. – P. 988–1006.

5. Мойсенович М.М., Архипова А.Ю., Орлова А.А. и др. Композитные матриксы на основе фиброина шёлка, желатина и гидроксиапатита // Acta Naturae. – 2014. – Т. 6, № 1 (20). – С. 103–109.

6. Rockwood D.N., Preda R.C., Yücel T., Wang X., Lovett M.L., Kaplan D.L. Materials fabrication from Bombyx mori silk fibroin // Nature Protocols. – 2011. – Vol. 6, № 10. – P. 1612–1631.

7. Ajisawa A. Dissolution of silk fibroin with calcium chloride/ethanol aqueous solution // Journal of Sericultural Science of Japan. – 1998. – Vol. 67, № 2. – P. 91–94.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.102

8. Min B.-M., Lee G., Kim S.H., Nam Y.S., Lee T.S., Park W.H. Electrospinning of silk fibroin nanofibers and its effect on the adhesion and spreading of normal human keratinocytes and fibroblasts in vitro // Biomaterials. – 2004. – Vol. 25, № 7–8. – P. 1289–1297.

9. Sill T.J., von Recum H.A. Electrospinning: applications in drug delivery and tissue engineering // Biomaterials. – 2008. – Vol. 29, № 13. – P. 1989–2006.

10. Agarwal S., Wendorff J.H., Greiner A. Use of electrospinning technique for biomedical applications // Polymer. – 2008. – Vol. 49, № 26. – P. 5603–5621.

11. Филатов Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / под ред. В.Н. Кириченко. – М.: ГНЦ РФ НИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1997.

12. ГОСТ 5100-85. Сода кальцинированная техническая. Технические условия.

13. ГОСТ 30266-2017. Мыло хозяйственное твёрдое. Общие технические условия.

14. ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия.