

НЕ РЕЦЕНЗИРОВАНО · NOT PEER-REVIEWED — препринт, опубликован до завершения рецензирования

УДК 677.051.164.6:67.05.

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОЙКИ ШЕРСТИ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ УСТАНОВКИ

Тугузбаева Робия Бердимуратовна, Хакимов Шеркул Шергозиевич

Toshkent to'qimachilik va yengil sanoat instituti

Тугузбаева Робия Бердимуратовна: ORCID 0009-0001-8480-9696, r60455698@gmail.com

Хакимов Шеркул Шергозиевич: ORCID 0000-0002-1933-1948, lionandlion9@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача ресурсосбережения при первичной обработке шерсти на малых предприятиях, расположенных вблизи мест заготовки сырья. Представлена усовершенствованная малогабаритная шерстомоечная машина с отжимным устройством, в котором шерсть отжимается рифлёным валом на участке огибающей его перфорированной сетки (пат. UZ FAP 02351). На основе закона Дарси показано, что при сжатии слоя, задаваемом зазором между валом и сеткой, объём отжимаемого раствора и импульс давления возрастают пропорционально длине зоны отжима, тогда как в паре отжимных валов при заданной силе прижатия импульс от ширины контакта не зависит. Полный факторный эксперимент 2^3 (8 опытов в трёх повторностях) показал, что остаточная влажность шерсти уменьшается с увеличением диаметра вала и возрастает с увеличением зазора и диаметра отверстий сетки; полученная регрессионная модель адекватна по критерию Фишера. Производственные испытания на грубой и полугрубой шерсти показали снижение влажности после отжима с 65–70 до 55–60 % (на 10 процентных пунктов, или примерно на 15 % относительно), удельного расхода воды — с 9,9 до 4,1 л/кг (в 2,4 раза), удельной электроёмкости — с 17,3 до 9,9 Вт·ч/кг (на 43 %), расхода моющего средства — на 42 % при эффективности очистки 92–95 %. Выход мытой шерсти снизился на 4 процентных пункта, причины чего обсуждаются. Установка рекомендована для малых и средних предприятий первичной обработки шерсти.

Ключевые слова: первичная обработка шерсти, шерстомоечная машина, отжимное устройство, перфорированная сетка, закон Дарси, факторный эксперимент, удельный расход воды, энергоэффективность.

Для цитирования: Тугузбаева Р. Б., Хакимов Ш. Ш. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОЙКИ ШЕРСТИ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ УСТАНОВКИ // ARGO — научный журнал. — 2026. — URL: <https://www.robotpit.com/journal/article/7-resursosberegaiushchaia-tekhnologii-moiki-shersti-na-osnove-usovershenstvovanno/>. (препринт, не рецензировано)

For citation: Tuguzbayeva, R. B., & Hakimov, S. S. (2026). РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОЙКИ ШЕРСТИ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ УСТАНОВКИ. ARGO Scientific Journal. <https://www.robotpit.com/journal/article/7-resursosberegaiushchaia-tekhnologii-moiki-shersti-na-osnove-usovershenstvovanno/> [Preprint, not peer-reviewed]

Поступила: 13.10.2026

© Авторы, 2026. Статья распространяется по лицензии CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОЙКИ ШЕРСТИ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация. Рассмотрена задача ресурсосбережения при первичной обработке шерсти на малых предприятиях, расположенных вблизи мест заготовки сырья. Представлена усовершенствованная малогабаритная шерстомоечная машина с отжимным устройством, в котором шерсть отжимается рифлёным валом на участке огибающей его перфорированной сетки (пат. UZ FAP 02351). На основе закона Дарси показано, что при сжатии слоя, задаваемом зазором между валом и сеткой, объём отжимаемого раствора и импульс давления возрастают пропорционально длине зоны отжима, тогда как в паре отжимных валов при заданной силе прижатия импульс от ширины контакта не зависит. Полный факторный эксперимент 2^3 (8 опытов в трёх повторностях) показал, что остаточная влажность шерсти уменьшается с увеличением диаметра вала и возрастает с увеличением зазора и диаметра отверстий сетки; полученная регрессионная модель адекватна по критерию Фишера. Производственные испытания на грубой и полугрубой шерсти показали снижение влажности после отжима с 65–70 до 55–60 % (на 10 процентных пунктов, или примерно на 15 % относительно), удельного расхода воды — с 9,9 до 4,1 л/кг (в 2,4 раза), удельной электроёмкости — с 17,3 до 9,9 Вт·ч/кг (на 43 %), расхода моющего средства — на 42 % при эффективности очистки 92–95 %. Выход мытой шерсти снизился на 4 процентных пункта, причины чего обсуждаются. Установка рекомендована для малых и средних предприятий первичной обработки шерсти.

Ключевые слова: первичная обработка шерсти, шерстомоечная машина, отжимное устройство, перфорированная сетка, закон Дарси, факторный эксперимент, удельный расход воды, энергоэффективность.

RESOURCE-SAVING WOOL SCOURING TECHNOLOGY BASED ON AN IMPROVED SMALL-SCALE MACHINE

Abstract. The paper addresses resource saving in the primary processing of wool at small enterprises located close to the places of wool collection. An improved small-scale wool scouring machine is presented in which wool is squeezed by a ribbed roller along the arc of a perforated screen wrapping it (patent UZ FAP 02351). Based on Darcy's law, it is shown that when the compression of the wool layer is set by the gap between the roller and the screen, the pressure impulse and the volume of expelled liquor increase in proportion to the length of the squeezing zone, whereas in a pair of squeeze rollers with a given pressing force the impulse does not depend on the contact width. A full factorial 2^3 experiment (8 runs in three replicates) showed that the residual moisture decreases with increasing roller diameter and increases with the gap and the screen hole diameter; the regression model is adequate by Fisher's criterion. Industrial trials on coarse and semi-coarse wool showed a reduction of moisture after squeezing from 65–70 to 55–60 % (by 10 percentage points, or about 15 % relative), of specific water consumption from 9.9 to 4.1 L/kg (2.4 times), of specific electricity consumption from 17.3 to 9.9 Wh/kg (by 43 %) and of detergent consumption by 42 %, with a cleaning efficiency of 92–95 %. The yield of scoured wool decreased by 4 percentage points; its causes are discussed. The machine is recommended for small and medium-sized enterprises engaged in the primary processing of wool.

Keywords: wool scouring, scouring machine, squeezing device, perforated screen, Darcy's law, factorial experiment, specific water consumption, energy efficiency.

1. Введение. Шерстяное волокно остаётся одним из основных натуральных сырьевых материалов текстильной промышленности, а первичная обработка шерсти — одним из наиболее водо- и энергоёмких её переделов [1]. Традиционная эмульсионная мойка требует 8–10 л воды на 1 кг немытой шерсти [5], тогда как уровень наилучших доступных технологий (НДТ) составляет 2–4 л/кг для средних и крупных предприятий и 6 л/кг — для малых [6]; в качестве мер НДТ выделены противоточная мойка с промежуточным механическим отжимом и рециркуляция промывных вод [7]. Физические методы интенсификации мойки — ультразвук [2], импульсные разряды [3], высокоэнергетическая обработка [4] — требуют дополнительного оборудования.

Узким местом шерстомоечных машин остаётся отжим шерсти между секциями барки: в паре отжимных валов отжим происходит лишь в зоне наименьшего зазора, при неравномерном слое верхний вал приподнимается, и влажность шерсти после валов составляет 60–80 % [8], а вместе с раствором в следующую секцию переносится растворённая грязь.

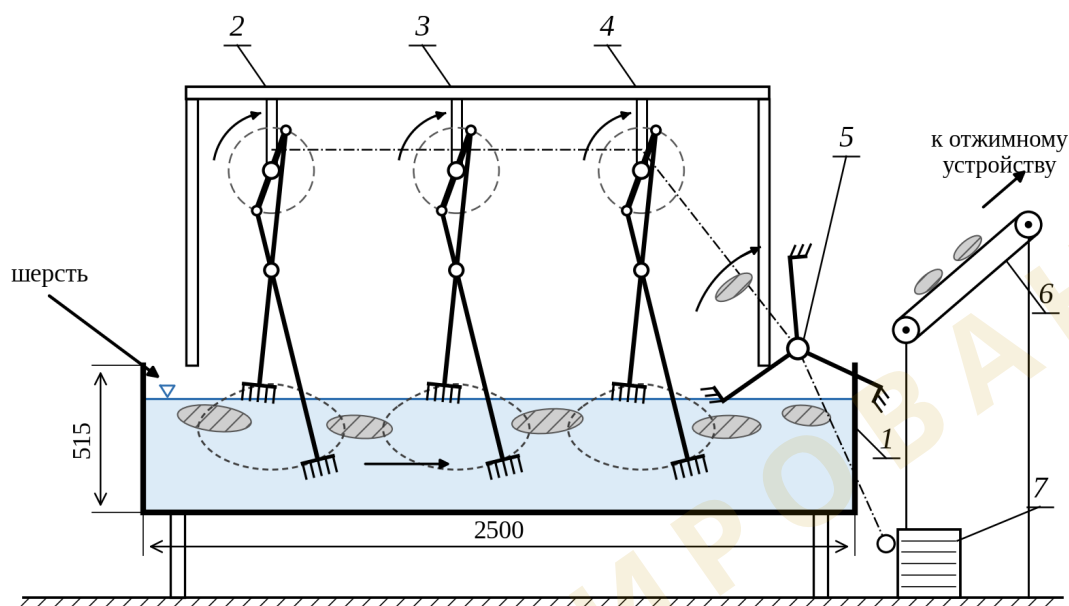
В Республике Узбекистан реализуются меры по развитию шерстяной отрасли и модернизации предприятий первичной переработки шерсти [10]. Вместе с тем из ежегодно заготавливаемых около 40 тыс. т шерсти перерабатывается лишь около 6 тыс. т, т. е. примерно 15 % [11]. Поскольку овцы в основном выпасаются в пустынных и горных районах, мойку шерсти целесообразно организовать вблизи мест заготовки с использованием малогабаритных водосберегающих установок [12, 13].

В работах [12–14] описаны конструкция малогабаритной шерстомоечной машины и отжимного устройства, в патенте [9] — его формула. **Научная новизна** настоящей статьи состоит в следующем: 1) дано обоснование преимущества протяжённой зоны отжима на основе закона Дарси с разграничением режимов «заданная сила прижатия» (пара валов) и «заданный зазор» (вал с огибающей сеткой); 2) приведены результаты полного факторного эксперимента 2^3 по влиянию диаметра вала, диаметра отверстий сетки и зазора на остаточную влажность шерсти и адекватная регрессионная модель, ранее представленные только в диссертации [18]; 3) выполнена оценка удельных показателей расхода воды, электроэнергии, моющего средства и теплоты на сушку в сопоставлении с уровнями НДТ [6, 7], а также вместимости барок, приведённой к единой базе. Описание конструкции (раздел 2) дано в объёме, необходимом для воспроизведения эксперимента; формула изобретения [9] и описания [12–14] в статье не повторяются.

Цель статьи — теоретическое обоснование и экспериментальная оценка ресурсосберегающей технологии мойки шерсти на малогабаритной машине, оснащённой отжимным устройством [9].

2. Конструкция установки. Машина (рис. 1) состоит из пяти последовательно расположенных моечных барок длиной 2500 мм, рабочей шириной 600 мм и высотой 515 мм. Рабочий объём раствора в такой барке не может превышать её геометрического объёма $2,5 \times 0,6 \times 0,515 \approx 0,77 \text{ м}^3$, тогда как рабочая ёмкость барки существующей машины МП-5Ш составляет 8 м^3 . Следовательно, при сравнении на единой основе — по рабочему объёму раствора — объём барки уменьшен не менее чем в 10 раз ($8 : 0,77 \approx 10,4$). Суммарный рабочий объём раствора в пяти барках составляет не более $3,9 \text{ м}^3$ против 40 м^3 у МП-5Ш. С учётом меньшей производительности машины удельная вместимость (объём раствора, приходящийся на 1 кг/ч производительности) составляет не более 8,6–9,7 л·ч/кг против 50–57 л·ч/кг у МП-5Ш (табл. 3), т. е. уменьшена при-

мерно в 5,8–5,9 раза (по средним значениям 9,1 и 53 л·ч/кг). Это позволяет организовать мойку шерсти с использованием водосберегающих мини-технологий по регионам. Основные конструктивные и режимные параметры машины и отжимного устройства приведены в табл. 1. VV/G



1 – моющая барка; 2, 3, 4 – прогонные грабли; 5 – выгрузчик-тройчатка; 6 – подающий транспортёр; 7 – электродвигатель; штриховые линии – траектории концов колков

Рис. 1. Схема усовершенствованной малогабаритной шерстомоечной машины (размеры в мм)

Прогонные грабли (рис. 2) перемещают шерсть по барке и перемешивают моющий раствор; они изготовлены из стали 45. Каждый грабельный механизм состоит из коленчатого вала с двумя держателями вилок на подшипниках; колена смещены на 180°, поэтому грабли поочередно погружаются в раствор, продвигают шерсть и возвращаются в исходное положение. Длина грабель — 250 мм, число прямых колков — 5.

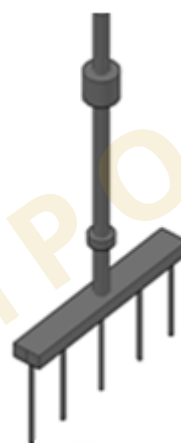
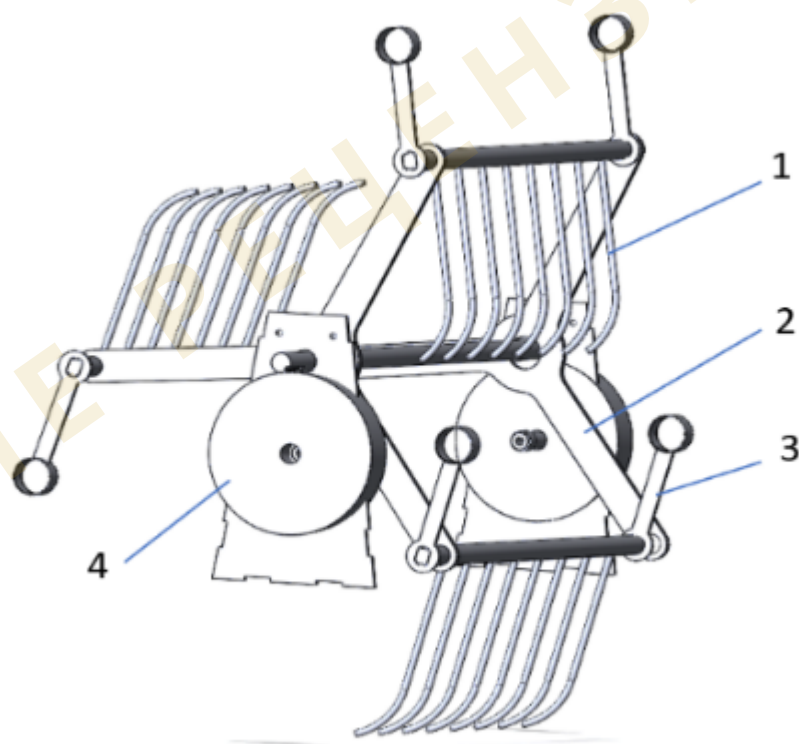


Рис. 2. Прогонные грабли

Выгрузатель-тройчатка (рис. 3) передаёт шерсть на отжимное устройство. Он состоит из трёх гребёнок длиной 310 мм с семью слегка изогнутыми колками, свободно установленных на двух концевых подшипниках качения; серповидные рычаги при движении перекатываются по валику и фиксируют положение гребёнок, необходимое для извлечения шерсти из раствора.

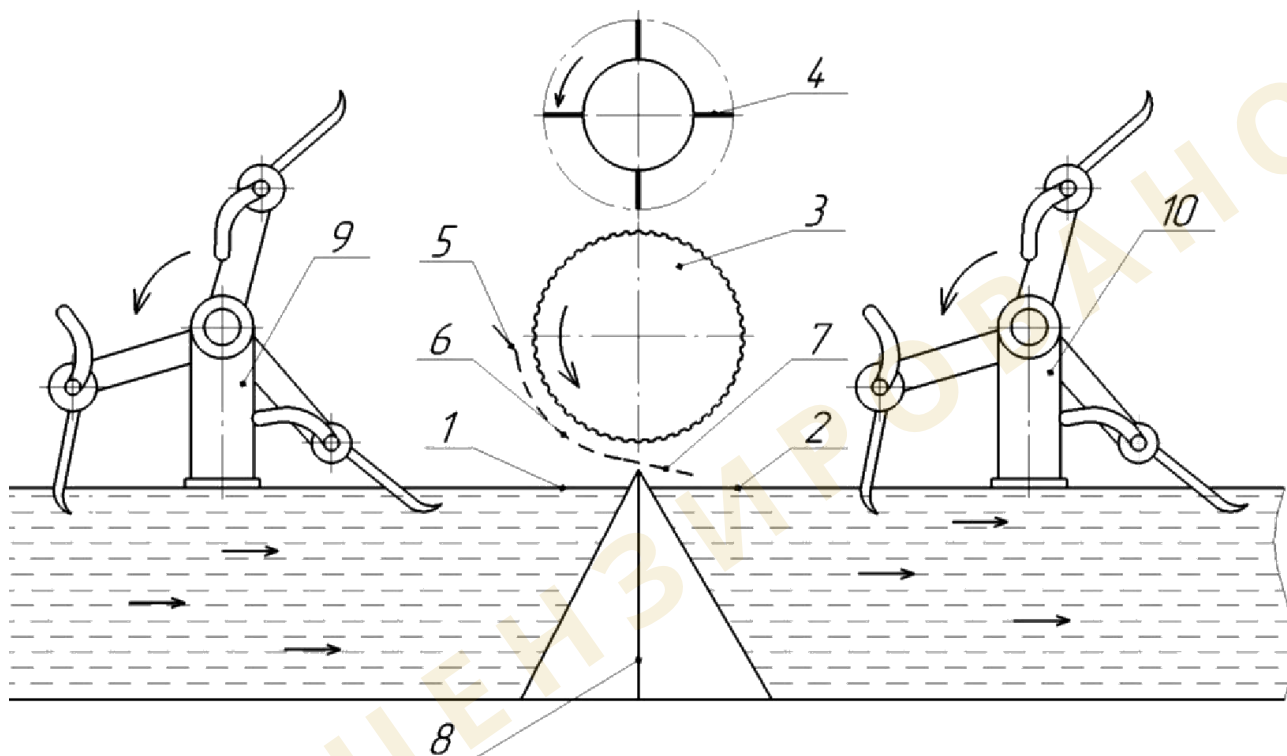


1 – колки грабель; 2 – тройчатка; 3 – рычаг; 4 – колесо

Рис. 3. Выгрузатель-тройчатка

Отжимное устройство выполнено по патенту UZ FAP 02351 [9] (рис. 4). Над линией стыка секций 1 и 2 барки установлен рифлёный отжимной вал 3, под которым закреплена

перфорированная сетка 5; её часть 6 огибает вал над секцией 1, а часть 7 расположена над секцией 2. Шерсть через планчатый барабан 4 направляется между валом и сеткой; загрязнённый раствор отжимается через сетку обратно в секцию 1, а отжатая шерсть по части 7 поступает в секцию 2 с более чистым раствором. Отжим происходит не по линии контакта двух валов, а на всём участке сетки, огибающем вал, что соответствует принципу противоточной мойки с промежуточным отжимом [7].



1, 2 – секции барки; 3 – рифлёный вал; 4 – планчатый барабан; 5 – сетка (6, 7 – её части); 8 – линия стыка; 9, 10 – подающий и отводящий механизмы

Рис. 4. Схема отжимного устройства [9]

Таблица 1. Конструктивные и режимные параметры машины и отжимного устройства [18]

Параметр	Значение
Производительность, кг/ч	400–450
Число барок	5
Длина × рабочая ширина барки, мм	2500 × 600
Частота вращения коленчатых валов грабель и выгрузателя, мин ⁻¹	10–15
Диаметр рифлёного отжимного вала D , мм	250
Рабочая ширина вала B , мм	600
Частота вращения вала n , мин ⁻¹	15
Окружная скорость вала $v = \pi Dn/60$, м/с	0,20
Диаметр планчатого барабана, мм / частота вращения, мин ⁻¹	260 / 30–35

Параметр	Значение
Диаметр отверстий сетки d , мм	2
Зазор между валом и сеткой h , мм	3
Угол охвата вала сеткой α (по схеме, рис. 4), град	≈ 90
Длина зоны отжима $L = Ra$, м	$\approx 0,20$
Время пребывания слоя в зоне отжима $t_2 = L/v$, с	$\approx 1,0$
Усилие прижатия вала к сетке (зазор h фиксирован)	не задаётся
Мощность привода отжимного устройства, кВт	1,1
Потребляемая мощность машины, кВт	4,2

3. Теоретическое обоснование отжима. Чтобы отделить моющий раствор от шерсти, скорость его движения относительно волокон должна быть больше нуля и направлена к перфорированной сетке; она определяется давлением в зоне контакта вала с сеткой, а также свойствами слоя шерсти и жидкости [15]. Эффективность отжима оценивают по влажности шерсти после отжима, отнесённой к массе сухой шерсти:

$$W_{\text{отж}} = \frac{G_{\text{вл}} - G_{\text{сух}}}{G_{\text{сух}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $G_{\text{вл}}$ — масса пробы шерсти после отжима, г; $G_{\text{сух}}$ — масса той же пробы, высушенной до постоянной массы, г.

Движение раствора относительно деформируемого волокнистого слоя описывается законом Дарси [16]:

$$\varepsilon (v_{\text{ж}} - v_{\text{ш}}) = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (2)$$

где ε — пористость слоя; $v_{\text{ж}}$, $v_{\text{ш}}$ — скорости раствора и волокна, м/с; k — проницаемость слоя, м²; μ — динамическая вязкость раствора, Па·с; p — давление, Па. Для слоя толщиной h , сжатого между валом и сеткой, удельный поток раствора через слой в направлении сетки приближённо равен

$$q = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta p}{h}, \quad (3)$$

где q — объёмный поток раствора через единицу площади, м³/(м²·с); Δp — перепад давления в слое, создаваемый его сжатием, Па. Объём раствора, отжимаемый с единицы площади слоя за время пребывания в зоне отжима t , составляет

$$V = q t = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta p}{h} t. \quad (4)$$

Мерой интенсивности отжима служит импульс давления $I = \int_0^t p dt$ [17]. Принципиально различаются два режима нагружения слоя (рис. 5).

Пара отжимных валов (заданная сила). Давление создаётся силой прижатия F верхнего вала и распределяется по площадке контакта шириной b , поэтому среднее давление $\bar{p}_1 = F/(Bb)$, время отжима $t_1 = b/v$, а импульс

$$I_1 = \bar{p}_1 t_1 = \frac{F}{b v} \quad (5)$$

не зависит от ширины площадки: увеличение b при той же силе снижает давление ровно настолько, насколько увеличивает время. Кроме того, при неравномерном слое верхний вал приподнимается, а отжатый раствор частично вновь впитывается слоем на выходе из зазора [17].

Вал с огибающей сеткой (заданный зазор). Сетка закреплена неподвижно, и слой на всей дуге охвата сжат до толщины, близкой к зазору h . Давление в слое определяется степенью его сжатия, т. е. зазором, а не внешней силой, и в первом приближении сохраняется на всей длине зоны $L = R\alpha$ (R — радиус вала, α — угол охвата, рад). Тогда $t_2 = R\alpha/v$ и

$$I_2 = \bar{p}_2 \frac{R\alpha}{v}, \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{R\alpha}{b} \quad \text{при} \quad \bar{p}_2 = \bar{p}_1. \quad (6)$$

Следовательно, при одинаковом уровне давления (одинаковой степени сжатия слоя), а не при одинаковой силе, протяжённая зона даёт импульс и, согласно (4), объём отжатого раствора в $R\alpha/b$ раз больше. Отжатый раствор при этом отводится через сетку по всей длине зоны и не возвращается в слой.

Из (3)–(6) следуют проверяемые выводы: остаточная влажность должна уменьшаться с увеличением радиуса вала (длины зоны L при тех же угле охвата и окружной скорости вала) и увеличиваться с ростом зазора h (меньше Δp и длиннее путь фильтрации). Для параметров табл. 1 ($R = 0,125$ м, $v = 0,20$ м/с, $\alpha \approx \pi/2$) длина зоны отжима $L = R\alpha \approx 0,20$ м, а время пребывания в ней слоя $t_2 = L/v \approx 1,0$ с. В паре валов зазор переменен: на расстоянии x от линии центров он равен $\delta + x^2/R_b$, где δ — минимальный зазор, R_b — радиус валов. Если считать зоной отжима участок, на котором зазор превышает минимальный не более чем на $\Delta h = 1$ мм, то её ширина $b = 2\sqrt{R_b \Delta h}$ для валов существующих машин диаметром 400–420 мм [18] составляет 28–29 мм, и при той же скорости слоя $t_1 = b/v \approx 0,14$ –0,15 с. Таким образом, в предлагаемом устройстве слой находится под максимальным сжатием примерно в 7 раз дольше ($L/b \approx 7$).

Абсолютное значение V по (4) зависит от проницаемости k сжатого слоя, которая определяется степенью его сжатия и диаметром волокон и в настоящей работе не измерялась. Однако при сравнении режимов при одинаковой степени сжатия слоя величины k , μ и h одинаковы, поэтому отношение объёмов отжимаемого раствора $V_2/V_1 = t_2/t_1 = R\alpha/b \approx 7$ от них не зависит. Вместе с тем объём отжимаемого раствора ограничен равновесным влагосодержанием сжатого слоя [17], поэтому остаточная влажность снижается не пропорционально L/b : модель (3)–(6) предсказывает направление влияния параметров и относительное преимущество протяжённой зоны, но не абсолютное значение $W_{\text{отж}}$. Для количественного прогноза необходимо экспериментальное определение зависимости $k(\varepsilon)$ для слоя шерсти, что является задачей дальнейших исследований. Экспериментальная проверка установленных зависимостей приведена в разделе 5.1.

Рифлёная поверхность вала препятствует скольжению шерсти по сетке под давлением и наматыванию шерсти на вал, обеспечивая её равномерное продвижение в зоне отжима.

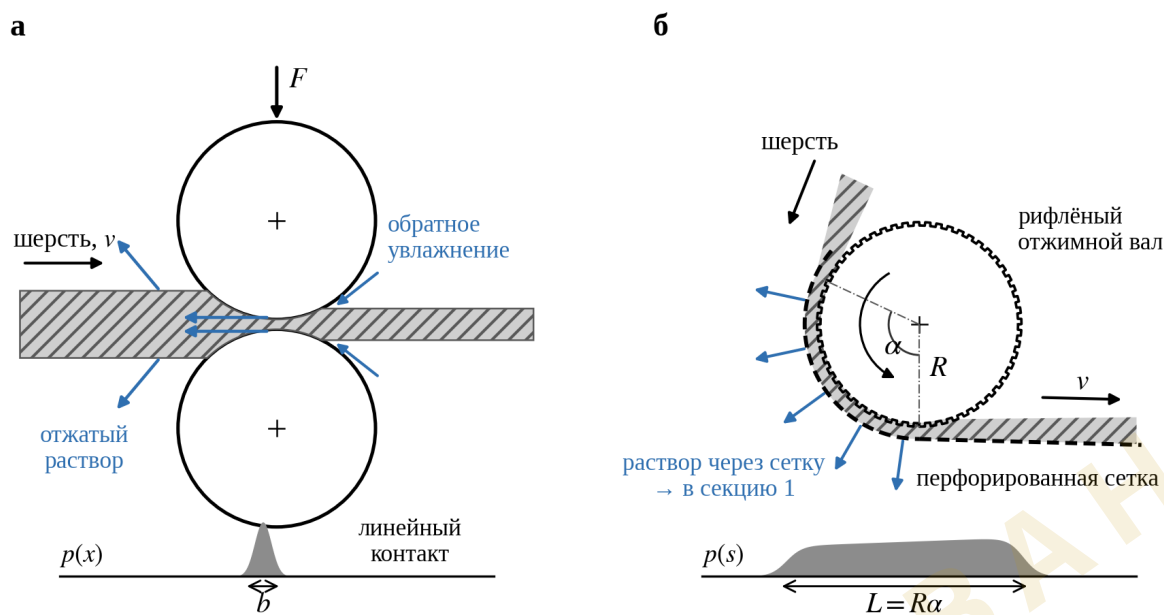


Рис. 5. Схемы отжима: а — парой валов; б — рифлёным валом с сеткой

4. Методика исследований. *Объект и условия испытаний.* Экспериментальная машина установлена и испытана в производственных условиях ООО «Hisori jun» (Олтинсайский район Сурхандарьинской области). В качестве существующего процесса рассматривалась линия МП-5Ш (пять барок по 8 м³, отжим парой валов), применяемая на предприятиях первичной обработки шерсти региона — ООО «Hisori jun» и ЧП «Oqbo'tayeva Zulxumor» [18]. Испытания проведены в 2022 г.; пробы мытой шерсти проанализированы в ноябре 2022 г. В дальнейшем машина с отжимным устройством внедрена также в ЧП «Oqbo'tayeva Zulxumor» (справка Комитета по развитию шелководства и шерстяной отрасли от 09.04.2024 № 1-1/287).

Сырьё и режим мойки. Испытания проводили на грубой и полугрубой шерсти весенней и осенней стрижки овец каракульской породы, заготовленной в Сурхандарьинской области (рис. 6). Состав невымытой шерсти по данным [18]: жиропот — 11–12 %, влага — 10 %, растительные примеси — 3 %, минеральные примеси — 4–14,5 %, навозные загрязнения — 2–2,5 %, чистое волокно — 58–70 %. Мойку вели в пяти барках с противоточным движением раствора: чистую воду подавали в последнюю барку. Первая барка служила для предварительного замачивания шерсти и удаления минеральных загрязнений; в её раствор добавляли 1,0–1,3 г/л Na₂CO₃. Основное обезжиривание проводили во второй барке при концентрации неионогенного моющего средства Ultravon GP (Ciba) 1,5–2,0 г/л, в третьей — при 0,8–1,0 г/л; четвёртая и пятая барки служили для полоскания. Продолжительность обработки шерсти составляла по 3 мин в каждой из первых трёх барок и по 1,5–2 мин в барках полоскания. Температуру раствора по ходу процесса ступенчато снижали с 60 до 35–40 °C [18]. Для существующего процесса (МП-5Ш) применялись то же моющее средство и тот же температурный режим.



Рис. 6. Образцы грубой и полугрубой шерсти: а — до мойки; б — после мойки

Определение влажности. Влажность шерсти после отжима определяли по ГОСТ 18080-95: в каждом опыте отбирали три лабораторные пробы массой по 100 г, взвешивали на весах с погрешностью $\pm 0,05$ %, высушивали в сушильном шкафу при (105 ± 2) °С до постоянной массы (первое взвешивание через 2,5–3,0 ч, последующие — через каждые 20 мин) и рассчитывали $W_{\text{отж}}$ по формуле (1).

Показатели качества мойки. Остаточное содержание жира в мытой шерсти определяли экстракцией в аппарате Сокслета (3 ч, водяная баня 75 ± 5 °C) по ГОСТ 21008-93, содержание растительных примесей — по ГОСТ 20270-84, минеральных примесей — по ГОСТ 29239-91 с кондиционированием проб по ГОСТ ISO 139-2014; анализы выполнены в испытательном центре «O'zbek-turk test markazi» (протокол № TL-632/1,2 от 08.11.2022). Эффективность очистки рассчитывали по остаточному содержанию загрязнений: $E_{оч} = (Z_0 - Z_1)/Z_0 \cdot 100$ %, где Z_0 и Z_1 — массовая доля загрязнений в шерсти до и после мойки, %.

Факторный эксперимент. Влияние параметров отжимного устройства на остаточную влажность исследовали методом полного факторного эксперимента 2^3 [18]. Факторы и уровни варьирования: x_1 — диаметр отверстий сетки $d = 1; 2; 3$ мм; x_2 — диаметр вала $D = 200; 250; 300$ мм; x_3 — зазор $h = 2; 3; 4$ мм (нижний, основной и верхний уровни). Каждый из $N = 8$ опытов выполняли в $m = 3$ повторностях (всего 24 опыта); машину запускали, и через 30 с включали подачу шерсти. Однородность дисперсий проверяли по критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии — по критерию Стьюдента, адекватность модели — по критерию Фишера при уровне значимости 0,05 [19].

Удельные показатели. Удельный расход воды $w = W_{см}/(G t_{см})$, л/кг, и удельную электроёмкость $e = N_{п}/G$, Вт·ч/кг, рассчитывали по расходу воды за смену $W_{см}$, производительности G , потребляемой мощности $N_{п}$ и продолжительности смены $t_{см} = 8$ ч; средние значения — по средней производительности, диапазоны — по граничным значениям табл. 3. Удельную вместимость V/G , л·ч/кг, рассчитывали как отношение суммарного рабочего объёма раствора в барках V к производительности.

Статистическая обработка сравнительных испытаний. Влажность $W_{отж}$ для каждого процесса определяли в четырёх опытах ($n = 4$), в каждом — по трём лабораторным пробам; результаты представлены диапазоном (минимум–максимум) и средним значением. Значимость различия средних $W_{отж}$ проверяли по t -критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05, оценивая среднее квадратическое отклонение (СКО) консервативно по размаху диапазона: $s = R/d_2$, где R — размах, $d_2 = 2,059$ — коэффициент для выборки объёмом $n = 4$, а также по непараметрическому критерию Манна–Уитни. Показатели w и e являются расчётными: их диапазоны определяются диапазоном производительности G при фиксированных за смену расходе воды и потребляемой мощности, а не случайной погрешностью, поэтому для них различие оценивалось по перекрытию диапазонов.

Сопоставимость и ограничения. Сравнимые машины имеют разную производительность, поэтому они сопоставлялись по удельным показателям. Для существующего процесса использованы данные производственного учёта линии МП-5Ш на тех же предприятиях, согласующиеся с литературными данными [8]; сырьё было одного вида и сезона стрижки, но не одной партии. Это обстоятельство рассматривается как ограничение исследования.

5. Результаты и обсуждение.

5.1. Влияние параметров отжимного устройства. Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2. Матрица планирования 2^3 и остаточная влажность шерсти после отжима, % [18]

№	x_1	x_2	x_3	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	s^2
1	–	–	–	57,0	57,5	58,3	57,60	0,43
2	+	–	–	58,3	58,5	58,7	58,50	0,04
3	–	+	–	54,5	55,2	55,4	55,03	0,22
4	+	+	–	57,2	56,2	57,4	56,93	0,41
5	–	–	+	58,5	57,2	56,8	57,50	0,79
6	+	–	+	59,8	59,5	59,0	59,43	0,16
7	–	+	+	55,1	56,3	56,2	55,87	0,44
8	+	+	+	57,1	58,8	57,0	57,63	1,02

Расчётное значение критерия Кохрена $G = 0,290$ меньше табличного $G_{0,05; 8; 2} = 0,52$, т. е. дисперсии однородны; дисперсия воспроизводимости $s_{\{y\}}^2 = 0,44$, среднее квадратическое отклонение воспроизводимости $s = 0,66$ %. Среднее квадратическое отклонение коэффициентов регрессии $s_{\{b\}} = 0,14$; при табличном значении $t_{0,05; 16} = 2,12$ значимы коэффициенты $|b| \geq 0,29$. Коэффициенты парных и тройного взаимодействия ($|b| = 0,09–0,15$) незначимы. После исключения незначимых коэффициентов получено уравнение регрессии в кодированных переменных

$$\hat{y} = 57,3 + 0,81 x_1 - 0,95 x_2 + 0,30 x_3. \quad (7)$$

Дисперсия адекватности $s_{\text{ад}}^2 = 0,31$ при числе степеней свободы $f = N - l = 4$ (l — число значимых коэффициентов); расчётное значение критерия Фишера $F_p = s_{\text{ад}}^2 / s_{\{y\}}^2 = 0,31/0,44 = 0,71$ меньше табличного $F_T = 3,0$ (при 4 и 16 степенях свободы), следовательно, модель (7) адекватна. В центре плана, т. е. при $d = 2$ мм, $D = 250$ мм и $h = 3$ мм, модель даёт $\hat{y} = 57,3$ %, что практически совпадает со средним значением 57,5 %, полученным в производственных испытаниях при тех же параметрах (разд. 5.2).

Знаки коэффициентов согласуются с выводами раздела 3. Увеличение диаметра вала с 200 до 300 мм (при том же угле охвата длина зоны возрастает в 1,5 раза) снижает остаточную влажность на 1,9 п.п.; увеличение зазора с 2 до 4 мм повышает её на 0,6 п.п. Рост влажности с увеличением диаметра отверстий сетки (на 1,6 п.п. при переходе от 1 до 3 мм) объясняется тем, что при крупных отверстиях уменьшается опорная поверхность сетки, слой вдавливаются в отверстия и сжимается неравномерно. Это объяснение является качественным: влияние диаметра отверстий моделью (3)–(6) не описывается и установлено экспериментально. Вместе с тем при $d = 2$ мм и $d = 300$ мм наблюдались заклинивание и повреждение волокна, а при $d = 200$ мм — наматывание шерсти на вал [18]. Поэтому в качестве рациональных приняты $d = 250$ мм, $D = 3$ мм и $h = 2$ мм (табл. 1). *LhDDDhd*

5.2. Сравнительные производственные испытания. Результаты приведены в табл. 3 и на рис. 7; значения указаны в виде диапазонов (минимум–максимум) по данным испытаний.

Таблица 3. Результаты сравнительных испытаний процессов мойки шерсти

Показатель	Существующий процесс (МП-5Ш)	Предлагаемый процесс
Влажность шерсти после отжима $W_{отж}$ (на сухую массу), %	65–70 (67,5)	55–60 (57,5)
Расход воды в барках за смену $W_{см}$, м ³	59,6	14
Удельный расход воды w , л/кг	9,3–10,6 (9,9)	3,9–4,4 (4,1)
Доля оборотной воды, %	70	80
Расход моющего средства, кг на 100 кг немытой шерсти	6	3,5
Производительность машины G , кг/ч	700–800	400–450
Суммарный рабочий объём раствора в барках V , м ³	40	≤ 3,9
Удельная вместимость V/G , л·ч/кг	50–57 (53)	≤ 8,6–9,7 (9,1)
Потребляемая мощность $N_{п}$, кВт	13	4,2
Удельная электроёмкость e , Вт·ч/кг	16,3–18,6 (17,3)	9,3–10,5 (9,9)
Выход мытой шерсти, %	64–66	60–62

Примечание: в скобках — средние значения (для $W_{отж}$ — по $n = 4$ опытам); для w , e и V/G — значения при средней производительности.

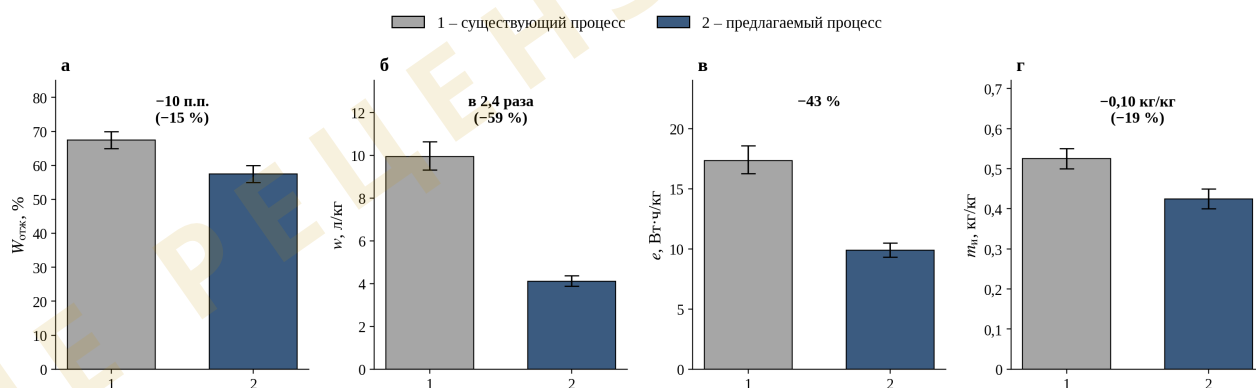


Рис. 7. Сравнение процессов мойки: а —

$W_{отж}$

; б —
 w

; в —
 e

; г —
 m_i

при
 W_k

= 15 %. Высота столбца — середина диапазона, «усы» — диапазон значений (минимум–максимум) по табл. 3

Влажность шерсти после отжима снизилась в среднем с 67,5 до 57,5 %, т. е. на 10 процентных пунктов, или на 14,8 % относительно исходного значения. Диапазоны значений

для двух процессов не перекрываются: все четыре значения для предлагаемого процесса меньше всех четырёх значений для существующего. При консервативной оценке СКО по размаху диапазона ($= 5$ п.п.,) расчётное значение $= 5,8$ превышает табличное $= 2,45$; критерий Манна-Уитни также подтверждает различие ($= 0$, $= 0,029$). Разность средних в 15 раз превышает и среднее квадратическое отклонение воспроизводимости опыта (0,66 %, разд. 5.1). Полученные значения согласуются с результатами испытаний устройства [14] и с моделью (7), которая при рациональных параметрах даёт 57,3 % (разд. 5.1). Поскольку модель (7) получена на той же машине, такое совпадение характеризует внутреннюю согласованность данных и не является независимой проверкой модели. $Rn = 4tt_{0,05; 6UP}$

Удельный расход воды уменьшился в 2,4 раза — с 9,9 до 4,1 л/кг, что близко к уровню НДТ для средних и крупных предприятий (2–4 л/кг) и ниже уровня 6 л/кг для малых предприятий [6]. Следует оговорить, что такое сопоставление корректно лишь при одинаковой базе учёта: в [6, 7] нормируется потребление свежей воды, тогда как в настоящей работе $W_{см}$ — объём воды, израсходованной в барках за смену (доля оборотной воды для обоих процессов приведена в табл. 3). Это обусловлено уменьшением рабочего объёма барок (суммарно с 40 до не более 3,9 м³, удельной вместимости — примерно в 5,9 раза) и увеличением доли оборотной воды с 70 до 80 %. Удельная электроёмкость снизилась с 17,3 до 9,9 Вт·ч/кг (на 43 %), расход моющего средства — с 6 до 3,5 кг на 100 кг немытой шерсти (на 42 %). Диапазоны расчётных значений и для двух процессов не перекрываются. we

Масса влаги, испаряемой при сушке на 1 кг сухой шерсти, $m_{и} = (W_{отж} - W_{к})/100$, кг/кг, где $W_{к}$ — конечная влажность после сушки, %, уменьшается на 0,10 кг/кг, т. е. на 17–20 % при $W_{к} = 10$ –17 % (рис. 7, г). При удельной теплоте парообразования воды $r = 2,26$ –2,36 МДж/кг (в интервале температур 100–60 °C [20]) теоретическая экономия теплоты составляет $\Delta Q = 0,10 r = 0,23$ –0,24 МДж на 1 кг сухой шерсти; фактическая экономия теплоты в $1/\eta$ раз больше, где η — КПД сушильной машины.

Показатели качества мытой шерсти определены в испытательном центре «O'zbek-turk test markazi» (протокол № TL-632/1,2 от 08.11.2022). Эффективность очистки шерсти на усовершенствованной машине, рассчитанная по остаточному содержанию загрязнений (разд. 4), составила 94,5 % для шерсти весенней и 92–95 % — осенней стрижки [18].

Выход мытой шерсти снизился в среднем на 4 процентных пункта (с 64–66 до 60–62 %). Возможными причинами являются потери коротких волокон через отверстия сетки и на колках грабель, более полное удаление жира и загрязнений, а также различие партий сырья. Прямого подтверждения второй причины в работе нет: эффективность очистки для существующего процесса (МП-5Ш) не измерялась. Разделить вклад этих факторов позволит определение выхода чистого волокна по методам IWTO (ГОСТ 30190-2000), которое предусмотрено на следующем этапе работы. Для оценки влияния на экономический эффект отметим, что снижение выхода на 4 п.п. соответствует уменьшению массы мытой шерсти на 0,04 кг на 1 кг перерабатываемого сырья (около 6 % продукции), тогда как на том же 1 кг сырья экономится 5,8 л воды, 7,4 Вт·ч электроэнергии и 25 г моющего средства, а в расчёте на 1 кг сухой шерсти — теплота испарения 0,10 кг влаги. Экономический эффект положителен, если стоимость сэкономленных ресурсов превышает стоимость фактически потерянного волокна; поскольку часть снижения выхода может быть обусловлена более полной очисткой, а не потерей волокна, окончательная оценка эф-

фекта возможна только после определения выхода чистого волокна. Меньшая производительность установки соответствует её назначению для малых и средних предприятий.

6. Заключение.

1. Применение рифлёного вала с огибающей его перфорированной сеткой переводит отжим из режима «заданной силы» в режим «заданного зазора», при котором при одинаковой степени сжатия слоя импульс давления и объём отжимаемого раствора возрастают пропорционально длине зоны отжима $L = R\alpha$.
2. Полный факторный эксперимент 2^3 подтвердил, что остаточная влажность снижается с увеличением диаметра вала и возрастает с увеличением зазора и диаметра отверстий сетки; рациональные параметры: $D = 250$ мм, $h = 3$ мм, $d = 2$ мм; при этих параметрах модель (7) даёт 57,3 %, что совпадает со средним значением, полученным в производственных условиях (57,5 %).
3. При уменьшении рабочего объёма барок не менее чем в 10 раз в производственных условиях влажность шерсти после отжима снизилась с 65–70 до 55–60 % (на 10 п.п., различие статистически значимо), удельный расход воды — в 2,4 раза (до 4,1 л/кг), удельная электроёмкость — на 43 %, расход моющего средства — на 42 %, масса испаряемой при сушке влаги — на 17–20 % при эффективности очистки 92–95 %.
4. Выход мытой шерсти снизился на 4 п.п.; его причины и влияние на экономический эффект подлежат уточнению с определением выхода чистого волокна по методам IWTO (ГОСТ 30190-2000).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Вклад авторов. Все авторы участвовали в подготовке рукописи и одобрили её окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Исследуемое отжимное устройство защищено патентом UZ FAP 02351 [9].

Список литературы

1. Simpson W.S., Crawshaw G.H. (eds.) Wool: Science and Technology. — Cambridge: Woodhead Publishing, 2002. — XIV, 368 p. — ISBN 978-1-85573-574-3.
2. Bahtiyari M.I., Duran K. A study on the usability of ultrasound in scouring of raw wool // Journal of Cleaner Production. — 2013. — Vol. 41. — P. 283–290. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.09.009.
3. Zhang Y., Pang G., Zhao Y., Wang X., Bu F., Zhao X. Pulsed electrohydraulic discharge for wool fiber cleaning // Journal of Cleaner Production. — 2016. — Vol. 112. — P. 1033–1039. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.08.023.
4. Kunik A., Semeshko O., Asauluk T., Sariyekova Y., Myasnykov S. Development of a two-step technology of scouring wool by the method of high-energy discrete treatment // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2016. — Vol. 4, No. 10(82). — P. 36–43. — DOI: 10.15587/1729-4061.2016.76380.
5. Shi C., Wang Q., Li D., Zeng B., Liu Q., Cui Y., Wang J., Wang X. Inorganic composite coagulant for wool scouring wastewater treatment: Performance, kinetics and coagulation mechanism // Separation and Purification Technology. — 2023. — Vol. 313. — Art. 123482. — DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123482.

6. European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for the Textiles Industry. — Seville: European IPPC Bureau, July 2003. — 626 p.
7. Commission Implementing Decision (EU) 2022/2508 of 9 December 2022 establishing the best available techniques (BAT) conclusions for the textiles industry // Official Journal of the European Union. — 2022. — L 325. — P. 112–161.
8. Горбунова Л.С., Рогачев Н.В., Васильева Л.Г., Колдаев В.М. Первичная обработка шерсти: учебник для средних специальных учебных заведений лёгкой промышленности. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. — 352 с.
9. Пат. UZ FAP 02351. Устройство для отжима шерсти в шерстомойной барке / Тугузбаева Р.Б., Хакимов Ш.Ш., Исмойилов Ф.Б., Махаммадиев З.О., Жураев Ж.Б. — Заявл. 28.03.2022; опубл. 30.11.2023, Бюл. № 11.
10. Постановление Президента Республики Узбекистан от 08.07.2021 г. № ПП-5178 «О дополнительных мерах по эффективному использованию действующих пастбищ и поддержке переработки шелка и шерсти в республике».
11. Рассмотрены приоритетные задачи по развитию кожевенно-обувной промышленности [Электронный ресурс] // Официальный веб-сайт Президента Республики Узбекистан. — 2026. — 5 мая. — URL: <https://president.uz/ru/lists/view/9177> (дата обращения: 14.10.2026).
12. Хакимов Ш.Ш., Тугузбаева Р.Б. Водосберегающая малогабаритная машина для мойки шерсти // Universum: технические науки. — 2021. — № 6-2 (87). — С. 83–85. — DOI: 10.32743/UniTech.2021.87.6.11976.
13. Хакимов Ш.Ш., Тугузбаева Р.Б. Проблемы переработки шерсти // Молодежь и XXI век – 2021: материалы XI Междунар. молодежной науч. конф. — Курск: ЮЗГУ, 2021. — С. 400–403.
14. Хакимов Ш.Ш., Тугузбаева Р.Б., Исмойилов Ф.Б. Устройство для отжима шерсти в моечной барке // Universum: технические науки. — 2022. — № 12-4 (105). — С. 19–21. — DOI: 10.32743/UniTech.2022.105.12.14771.
15. Тугузбаева Р.Б., Хакимов Ш.Ш., Ахмедова З. Анализ теоретических основ процесса промывки шерсти // Молодежь и XXI век – 2022: материалы Междунар. молодежной науч. конф. — Курск, 2022. — С. 402–405.
16. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media. — New York: Dover, 1988. — XVII, 764 p. — ISBN 978-0-486-65675-5.
17. McDonald J.D., Kerekes R.J. Pragmatic mathematical models of wet pressing in papermaking // BioResources. — 2017. — Vol. 12, No. 4. — P. 9520–9537. — DOI: 10.15376/biores.12.4.McDonald.
18. Тугузбаева Р.Б. Совершенствование рабочих органов шерстомоечной машины: дис. ... д-ра философии (PhD) по техн. наукам: 05.02.03. — Ташкент: ТИТЛП, 2024.
19. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1976. — 280 с.
20. Wagner W., Pruss A. The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use // Journal of Physical and Chemical Reference Data. — 2002. — Vol. 31, No. 2. — P. 387–535. — DOI: 10.1063/1.1461829.