

УДК 504:57.042:637.631  
DOI 10.17513/use.38314

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРО-ПУХОВЫХ ОТХОДОВ КАК КОМПОНЕНТА СМАЧИВАЮЩЕГО СОСТАВА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

**Бортников С.В., Горенкова Г.А., Сумина А.В., Беспалова М.А.**

*ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова», Абакан,  
e-mail: svb@khsu.ru*

Цель исследования состояла в том, чтобы получить из широко распространенного, но мало перерабатываемого перо-пухового сырья продукт, который выполняет функцию поверхностно-активного вещества в составе смачивателя для подавления угольной пыли. В качестве материала для исследования были использованы образцы куриного пера, которое подвергалось щелочному гидролизу в восстановительной среде. Приводятся экспериментальные данные об изменении концентрации белка в процессе растворения куриного пера в исследуемой системе. Выявлены оптимальные условия для процесса перевода кератина куриного пера в водорастворимую форму, которые могут быть использованы для создания технологии переработки ценного, но мало используемого природного сырья – перо-пуховых отходов птицеводства. В работе приводятся аналитические данные лабораторного эксперимента по получению рабочего состава для смачивания гидрофобной поверхности угольных частиц на основе водного раствора белкового гидролизата куриного пера. Показано, что исследуемая система, проявляя поверхностно-активные свойства и адсорбируясь на поверхности угольных частиц пыли, увеличивает эффективность применяемых составов смачивателей, что способствует повышению эффективности борьбы с угольной пылью. Использование данного подхода утилизации перо-пуховых отходов позволит снизить загрязнение окружающей среды за счет уменьшения количества биологических отходов, размещенных на полигонах, а также за счет снижения запыленности атмосферного воздуха.

**Ключевые слова:** пылеподавление, гидрообеспыливание, перо-пуховые отходы, угольная пыль, гидролизат белка

*Исследование выполнено за счет гранта Министерства образования и науки Республики Хакасия (Соглашение № 93 от 13.12.2022).*

## PROSPECTS FOR USING FEATHER-DOWN WASTE AS A COMPONENT OF A WETTING COMPOSITION TO SUPPRESSION COAL DUST

**Bortnikov S.V., Gorenkova G.A., Sumina A.V., Bespalova M.A.**

*Khakass State University named N.F. Katanov, Abakan, e-mail: svb@khsu.ru*

The goal of the study was to obtain a product from the widespread but little processed feather and down raw materials that acts as a surfactant in a wetting agent for suppressing coal dust. Samples of chicken feathers subjected to alkaline hydrolysis in a reducing medium were used as the material for the study. Experimental data on the change in protein concentration during the dissolution of chicken feathers in the studied system are presented. Optimal conditions for the process of converting chicken feather keratin into a water-soluble form have been identified, which can be used to create a technology for processing valuable, but little used natural raw materials – feather and down waste from poultry farming. The paper presents analytical data from a laboratory experiment to obtain a working composition for wetting the hydrophobic surface of coal particles based on an aqueous solution of chicken feather protein hydrolysate. It is shown that the system under study, exhibiting surface-active properties and adsorbing on the surface of coal dust particles, increases the effectiveness of the wetting compositions used, which helps to increase the effectiveness of coal dust control. The use of this approach to the utilization of feather and down waste will reduce environmental pollution by reducing the amount of biological waste placed in landfills, as well as by reducing the dustiness of the atmospheric air.

**Keywords:** dust suppression, hydro-dedusting, coal dust, feather and down waste, protein hydrolysate

*The research was carried out at the expense of a grant from the Ministry of Education and Science of the Republic of Khakassia (Agreement No. 93 dated 12/13/2022).*

### Введение

Как известно, рациональное управление отходами – важный аспект устойчивого развития различных предприятий и сохранения окружающей среды. Согласно данным статистики, за период с 2021 по 2024 годы мировой рынок производства мяса птицы вырос на 4,1%, а количество отходов составило 68 млрд т, из которых 5 млрд т – это перо-пуховые отходы [1–3].

На данный вид отходов приходится 4–6% от общего веса птицы. К сожалению, по мнению многих производителей, данный вид биологических отходов считается бесполезным продуктом птицеводства и редко используется вторично. В большей части он сжигается или складывается на полигонах, тем самым являясь источником загрязнения окружающей среды. При этом перо-пуховые отходы биоразлагаемы по своей

природе и содержат более 85% сырого протеина, 70% аминокислот, витаминов и ценных элементов; кроме того, после несложных технологических операций его можно использовать в качестве корма, удобрения и биопленки [1, 4].

Куриные перья имеют стабильную структуру благодаря большому количеству жесткого белка – кератина, третьего по распространенности материала после хитина и целлюлозы. Вторичная структура кератина состоит из  $\alpha$ -спирали и  $\beta$ -листа. В  $\beta$ -кератинах обычно встречаются  $\beta$ -гофрированные листы, тогда как в  $\alpha$ -кератинах обычно присутствуют структуры, закрученные  $\alpha$ -спиралью. Различия в составе  $\alpha$ - и  $\beta$ -кератинов существуют в различных органах. Например,  $\alpha$ -кератин присутствует в шерсти, а в перьях имеются как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -кератины. Кератин богат дисульфидными связями и остатками цистеина, его стабильность обусловлена относительно высокой механической прочностью благодаря наличию плотной полимерной структуры в сочетании с гидрофобными силами и водородными связями. Биосовместимость, возобновляемость, экологичность и способность к биологическому разложению определяют возможность применения кератина в различных областях, в том числе для борьбы с загрязнениями окружающей среды [5, 6].

Адсорбирующие материалы уже давно используются для устранения загрязнений окружающей среды. В настоящее время большое внимание уделяется разработке устойчивых адсорбирующих материалов для долгосрочного использования в экологически безопасных и экономически эффективных целях восстановления. «Зеленые», или экологически чистые, сорбенты, как правило, изготавливаются из возобновляемых или переработанных ресурсов, оказывают минимальное токсическое воздействие, включают процессы синтеза с незначительными химическими или энергетическими затратами, обладают высокой возможностью повторного использования и не приводят к дополнительным отходам или загрязнению [7, 8].

В научной литературе показано, что куриные перья могут использоваться в качестве биополимеров для очистки сточных вод благодаря своим уникальным физическим и химическим свойствам. Присутствие белка кератина в куриных перьях играет важную роль в адсорбции благодаря боковым цепям, присоединенным к поли-

пептидной структуре. Связанные с кератином белки содержат боковые цепи цистеина, которые, как предполагается, образуют дисульфидные связи, сшивающие промежуточные нити кератина. В полипептидах несколько аминокислот с идентифицируемыми боковыми цепями обладают специфической химической структурой, зарядом, реакционной способностью и способностью к связыванию. Такие боковые цепи не участвуют в образовании полипептида, однако играют значительную роль в адсорбции. После прохождения различных химических обработок их полезность для удаления загрязняющих веществ варьируется. Повышение поверхностного сродства кератина к загрязнителям сточных вод объясняется разрушением дисульфидных поперечных связей в нативном кератине, которые раскрываются и обнажают свободные функциональные группы с избыточным потенциалом для адсорбции микроэлементов [9].

Кроме того, химическая и термическая обработка пера птицы оказывает положительное влияние на термостабильность и пористость материалов, что делает их перспективными биосорбентами для тяжелых металлов, например для As (III). Наличие свободных электронов на не полностью заполненных  $d$  орбиталях большинства тяжелых металлов приводит к тому, что в ходе биохимической реакции они образуют соединения, которые являются высокотоксичными загрязнителями для живых организмов. Благодаря способности адсорбировать ионы металлов из воды такие функциональные группы, как карбоксильные, гидроксильные, сульфгидрильные и амидо-, делают куриные перья перспективными сорбентами. На данный момент времени в научной литературе приводятся данные по изучению вопроса использования куриных перьев в качестве сорбентов для удаления ионов тяжелых металлов и иных загрязнителей, включая  $Pb^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  и  $U^{2+}$ . При сравнении сорбционной способности куриных перьев и других биосорбентов на основе кератина, например волос, было установлено, что первые являются более эффективными сорбентами с более высокой поглощающей способностью и более коротким временем равновесия – 8 часов [1, 9].

Как было отмечено выше, предварительная обработка может способствовать высвобождению активных центров, таких как гидроксильные и аминогруппы, в сырых куриных перьях. Химическая обработ-

ка с использованием этилендиамина при-носит больше функциональных возможностей первичных аминов в их структуры и обеспечивает дополнительные центры адсорбции ионов металлов. Кроме того, слабо скоординированный  $\text{Na}^+$  после обработки  $\text{NaOH}$  может быть легко заменен ионами других загрязняющих металлов. Таким образом, химически обработанные куриные перья демонстрируют гораздо более высокую адсорбционную способность по нескольким ионам металлов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Ni}^{2+}$ ), чем необработанные [9].

Основываясь на вышеизложенном, можно заключить, что как с экологической, так и с экономической точки зрения важно искать пути превращения перо-пуховых отходов в новые материалы, которые могли бы быть использованы для снижения загрязнений окружающей среды. Важно, чтобы данные материалы обладали высокой сорбционной способностью, высокой стабильностью и возможностью повторного использования. Основное внимание в научной литературе уделяется изучению использования биосорбционных материалов на основе кератина для адсорбции загрязняющих веществ из почвы и водных объектов. Вместе с тем, загрязнение атмосферного воздуха, в том числе угольной пылью, представляет собой серьезную проблему, особенно для территорий угледобычи, к которым, в частности, относится Республика Хакасия. Из вышесказанного следует, что борьба с образованием угольной пыли в атмосфере является важной и неотъемлемой частью технологий угледобычи.

В целях предотвращения пылеобразования при разрушении, переработке и транспортировке пылящего материала и подавления образовавшейся пыли на добывающих и перерабатывающих горных предприятиях проводятся работы по увлажнению массивов горных пород и улавливанию летающей пыли. Эта группа методов, направленных на снижение содержания в атмосфере пыли и основанных на смачивании частиц водой, называется «гидрообеспыливание». При гидрообеспыливании используется свойство воды смачивать пылевые частицы и связывать их между собой, с кусками породы и с прочими предметами, на которые осаждается пыль. Существенное ограничение данной технологии заключается в гидрофобности поверхности угля, которая препятствует смачиванию водой частиц угольной пыли. Для увеличения способности смачиваться необходимо изменить

природу поверхности частиц – сделать ее гидрофильной.

Решение этой проблемы возможно путем изменения физико-химических свойств жидкости, применяемой для обработки. Для этого необходимо вносить в воду специальные реагенты, которые увеличивают смачиваемость (адгезию). Соединения с такими свойствами в химии известны – поверхностно-активные вещества (ПАВ) различного состава. Проблема их практического внедрения заключается в подборе для конкретной ситуации (подавление угольной пыли), в том числе с учетом эколого-экономического аспекта.

В связи с этим перспективным является изучение возможности применения веществ природного происхождения, таких как продукты переработки перо-пухового сырья. Продукт щелочного гидролиза перо-пуховых отходов представляет собой водный раствор белка кератина, который может выступать в роли поверхностно-активного вещества, улучшающего смачивание гидрофобных поверхностей, в том числе поверхности частиц угольной пыли. Этот продукт получают путем щелочного гидролиза пера в присутствии сульфида натрия, который способствует полному растворению кератинового сырья благодаря восстановлению дисульфидных связей в белковой структуре.

**Цель исследования** состояла в том, чтобы получить из широко распространенного, но мало перерабатываемого перо-пухового сырья продукт, который выполняет функцию поверхностно-активного вещества в составе смачивателя для подавления угольной пыли.

#### **Материал и методы исследования**

В качестве материала для исследования были использованы образцы куриного пера, которое подвергалось щелочному гидролизу в восстановительной среде.

Гидролиз перо-пухового сырья проводили при температуре 20–25°C при различной концентрации гидроксида натрия и сульфида натрия. Для этого создавали рабочие составы перо: гидроксид натрия: сульфид натрия: вода с разным количественным соотношением компонентов, состав которых представлен в таблице.

Концентрацию белка определяли методом Лоури по интенсивности окраски биуретового комплекса.

Поверхностное натяжение определяли по методу отрыва кольца с помощью тензиометра модели DST 30.

## Исследуемые модельные системы

Рабочий состав	Содержание пера, масс.%	Содержание NaOH, масс.%	Содержание Na <sub>2</sub> S, масс.%	Содержание H <sub>2</sub> O, масс.%
1	2,5	0,05	4,7	92,8
2	2,5	0,1	4,8	92,6
3	2,5	0,2	4,9	92,4
4	2,5	0,3	5,0	92,2
5	2,5	0,4	5,1	92,0

Измерение смачивания поверхности угольных частиц водными растворами модельных систем проводили по методу капиллярного впитывания, для чего навеску угольной пыли массой 1 г помещали в воронку Шотта (ПОР 100) с пористостью 0,04–0,1 мм. Оценивали скорость смачивания угольной пыли по времени достижения условной точки (0,6 мл раствора на 1 г угольной пыли).

Повторность всех измерений трехкратная. Достоверность различий вариантов оценивали по t-критерию Стьюдента при  $p \leq 0,05$ . Статистическую обработку результатов выполняли с помощью программы Microsoft Excel.

#### Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 1 отражены результаты определения концентрации белка в исследуемых рабочих составах (1–5) в процессе

щелочного гидролиза куриного пера при комнатной температуре (20–25°C). Можно видеть, что максимальная концентрация белка (5,4 масс.%) достигается в течение 72 часов в составе 3, состоящем из пера, гидроксида натрия, сульфида натрия и воды при соотношении реагентов 2,5:0,2:4,9:92,4. При этом имеет место полное растворение биомассы пера.

Результаты измерений поверхностного натяжения рабочих составов представлены на рисунке 2 (кривая 1). Уменьшение поверхностного натяжения раствора гидролизата при увеличении концентрации раствора однозначно свидетельствует о том, что полученный гидролизат обладает свойствами поверхностно-активного вещества. В связи с этим можно предположить, что он способен адсорбироваться на различных поверхностях, в частности на поверхности частиц угольной пыли.

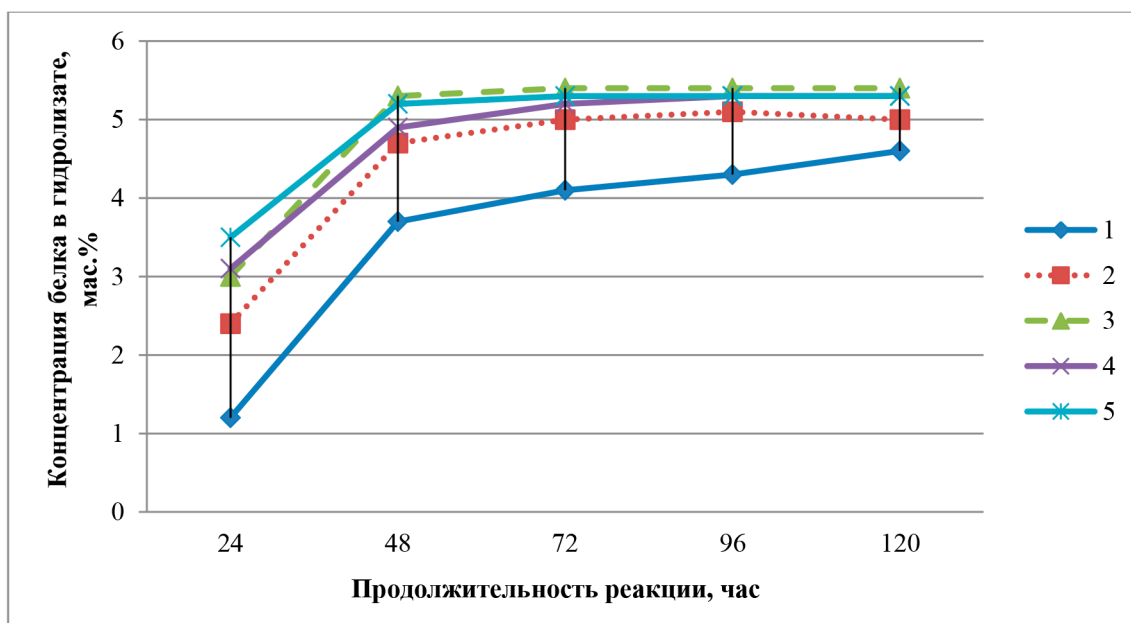


Рис. 1. Зависимость концентрации белка от количественного соотношения компонентов в рабочем составе в процессе щелочного гидролиза куриного пера

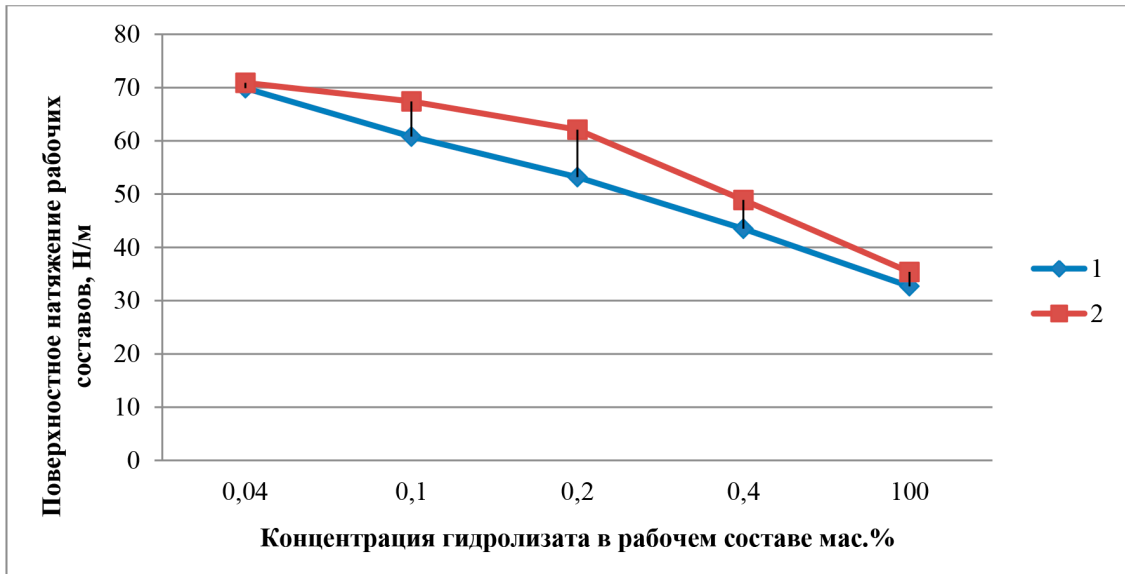


Рис. 2. Зависимость поверхностного натяжения рабочих составов от концентрации гидролизата: 1 – до контакта с каменноугольной пылью; 2 – после контакта с каменноугольной пылью

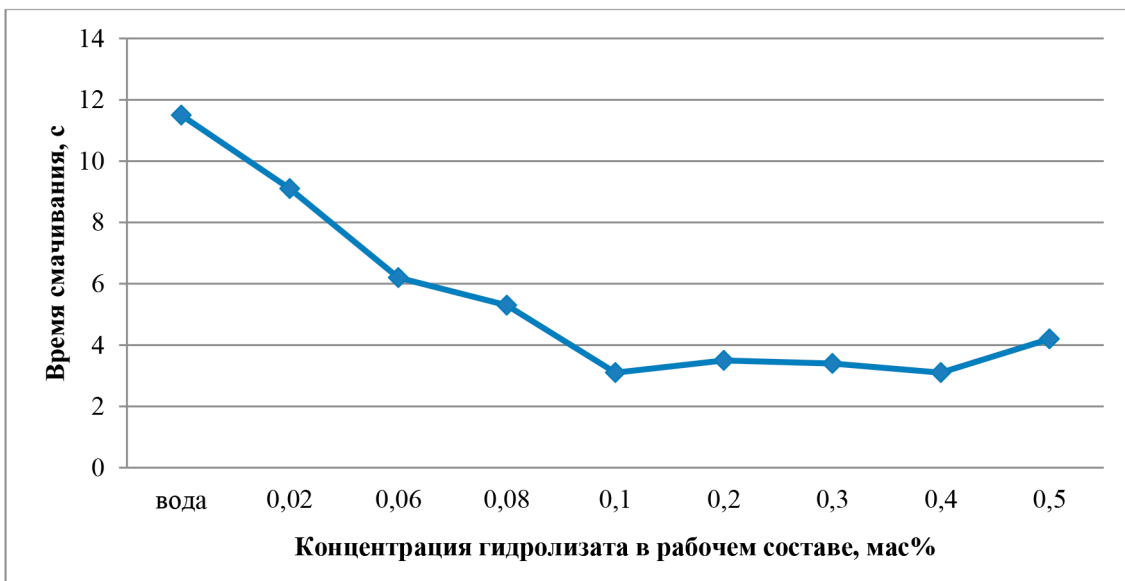


Рис. 3. Зависимость скорости смачивания угольной пыли рабочим составом с разной концентрацией гидролизата

На рисунке 2 (кривая 2) представлены результаты измерения поверхностного натяжения растворов гидролизата после контакта с каменноугольной пылью. Увеличение поверхностного натяжения можно объяснить только тем, что белок адсорбируется на поверхности угольных частиц. При этом максимальная разница в поверхностном натяжении наблюдается при концентрации гидролизата 0,20 масс.%, что свидетельствует о лучшей адсорбции белка на угле при данной концентрации.

Адсорбция поверхностно-активного вещества на поверхности угольных частиц делает их поверхность гидрофильной и увеличивает смачиваемость водой. Рисунок 3 отражает результаты определения скорости смачивания угольной пыли растворами гидролизата различной концентрации.

Из рисунка 3 следует, что скорость смачивания угольной пыли раствором гидролизата повышается при увеличении концентрации гидролизата и достигает максимальных значений в диапазоне от 0,10 до 0,40 масс.%.

Дальнейшее увеличение содержания гидролизата в растворе не приводит к увеличению скорости смачивания. Следует отметить, что максимальная скорость смачивания угольной пыли раствором гидролизата в среднем в 3 раза выше, чем водой.

В лабораторных условиях проведен эксперимент по получению гидролизата куриного пера, обладающего поверхностно-активными свойствами, способного адсорбироваться на поверхности каменноугольных частиц и увеличивать смачиваемость поверхности угля, что способствует повышению эффективности борьбы с угольной пылью. Таким образом, использование данного метода утилизации перо-пуховых отходов позволит снизить загрязнение окружающей среды в двух направлениях: во-первых, посредством снижения количества отходов, размещенных на полигонах, во-вторых, за счет снижения запыленности атмосферного воздуха.

#### Список литературы

1. El Salamony D.H., Hassouna M.S.E., Zaghoul T.I., Abdallah H.M. Valorization of chicken feather waste using recombinant bacillus subtilis cells by solid-state fermentation for soluble proteins and serine alkaline protease production // *Biore-source Technology*. 2024. Vol. 393. P. 130110. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.130110.
2. Chukwu K.O., Anyanwu C.U., Nnamchi C.I., Onwosi C.O., Ndukwe J.K. Keratinases Applications and Biovalorization of Keratin as an Eco-Friendly and Efficient Management Biotechnological Applications // *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2022. Vol. 7, Is. 9. P. 498-508. DOI: 10.5281/zenodo.7124447.
3. Amin S., Abbas M., Javed H., Asghar Z., Ghani N., Shaheen S., Yousaf H.S. Extraction of Keratin from Chicken Feathers and its Application in the Treatment of Contaminated Water: an Eco-Friendly Approach // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. 2024. Vol. 67. P. e24220892. DOI: 10.1590/1678-4324-2024220892.
4. Nogja G.N., Jadhav M.P. Extraction of keratin from chicken feather and Spectral Characterization of protein by FTIR // *Int. J. Emerg. Technol. Innov. Res.* 2019. Vol. 6. Is. 1. P. 698-702. DOI: 10.6084/m9.figshare.15097290.v1.
5. Peng Z., Mao X., Zhang J., Du G., Chen J. Effective biodegradation of chicken feather waste by co-cultivation of keratinase producing strains // *Microbial cell factories*. 2019. Vol. 18. P. 1-11.
6. Liu Y., Biswas B., Hassan M., Naidu R. Green Adsorbents for Environmental Remediation: Synthesis Methods, Ecotoxicity, and Reusability Prospects // *Processes*. 2024. Vol. 12. № 6. P. 1195. DOI: 10.3390/pr12061195.
7. Shavandi A., Bekhit A.E.D.A., Carne A., Bekhit A. Evaluation of keratin extraction from wool by chemical methods for bio-polymer application // *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*. 2017. Vol. 32. Is. 2. P. 163-177. DOI: 10.1177/0883911516662069.
8. Tesfaye T., Sithole B., Ramjugernath D. Valorisation of chicken feathers: a review on recycling and recovery route-current status and future prospects // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017. Vol. 19. P. 2363-2378. DOI: 10.1007/s10098-017-1443-9.
9. Wang B., Yang W., McKittrick J., Meyers M. A. Keratin: Structure, mechanical properties, occurrence in biological organisms, and efforts at bioinspiration // *Progress in materials science*. 2016. Vol. 76. P. 229-318. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2015.06.001.