



**ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ СОРБЦИИ КОНСЕРВИРУЮЩЕГО
РАСТВОРА КОЛЛАГЕНА НА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ**

Рафиков Адхам Салимович

*д.х.н., проф. кафедры «Естественные науки» Ташкентского
института текстильной и легкой промышленности, Республика
Узбекистан, г. Ташкент*

E-mail: asrafikov@mail.ru

Рейимов Азимбай Файзуллаевич

*PhD, доц. кафедры «Естественные науки» Ташкентского института
текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан, Ташкент*

E-mail: afreyimov@bk.ru

Абдусаматова Дилфуза Озатовна

*к.х.н., доцент, кафедры «Естественные науки» Ташкентского
института текстильной и легкой промышленности, Республика Узбекистан,
Ташкент*

E-mail: d.abdusamatova@ttyesi.uz

Каримов Сардорбек Ходжибаевич

*PhD, доцент, кафедры «Естественные науки» Ташкентского
института текстильной и легкой промышленности, Республика
Узбекистан, Ташкент*

E-mail: ssskarim81@gmail.com

Ибодуллоев Бекзод Шухратўгли

*PhD, старший преподаватель, кафедры «Естественные
науки» Ташкентского института текстильной и легкой промышленности,
Республика Узбекистан, Ташкент*

E-mail: bshibodulloyev@mail.ru

**STUDY OF THE KINETICS OF SORPTION OF A PRESERVING
COLLAGEN SOLUTION ON TEXTILE MATERIALS**



Rafikov Adkham Salimovich

Doctor of Chemical Sciences, Professor of the Department of Natural Sciences, Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan, Tashkent

E-mail: asrafikov@mail.ru

Reyimov Azimbay Fayzullaevich

PhD, Assoc. Prof. Department of Natural Sciences, Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan, Tashkent

E-mail: afreyimov@bk.ru

Abdusamatova Dilfuza Ozotovna

PhD, Associate Professor, Department of Natural Sciences, Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan, Tashkent

E-mail: d.abdusamatova@ttyesi.uz

Karimov Sardorbek Khodjibaevich

PhD, Associate Professor, Department of Natural Sciences, Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan, Tashkent

E-mail: sssskarim81@gmail.com

Ibodulloev Bekzod Shukhratogli

PhD, Senior Lecturer, Department of Natural Sciences, Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Republic of Uzbekistan, Tashkent

E-mail: bshibodulloyev@mail.ru

АННОТАЦИЯ: Изучена кинетика сорбции коллагенконсервирующих растворов, полученных из природных полимеров, на хлопчатобумажных, шелковых, лавсановых и лавсан-хлопчатобумажных материалах. Изучены концентрация раствора при сорбции коллагенконсервирующего раствора, полученного в процессе сорбции на материалах, продолжительность сорбции. Проведен анализ кинетики сорбции коллагенового раствора на материалах с использованием моделей псевдопервого и псевдовторого порядков. Рассчитаны константы скорости в результате сорбции. Соответствие



кинетики сорбции модели псевдвторого порядка определено по значению коэффициента корреляции R^2 . Рассчитана энергия сорбции коллагенового раствора на материалах. Энергия активации коллагенового раствора в процессе сорбции составляет для хлопчатобумажной ткани 28222 кДж/моль, для ткани хлопок+лавсан 35690 кДж/моль, для ткани лавсан 41250 кДж/моль и для шелковой ткани 32947 кДж/моль. На основании полученных значений установлено, что сорбция раствора коллагена тканями увеличивается в следующем ряду: хлопок < шелк < хлопок+лавсан < лавсан.

Ключевые слова: коллаген, текстильные материалы, кинетика сорбции.

ABSTRACT: *The kinetics of sorption of collagen-preserving solutions obtained from natural polymers onto cotton, silk, lavsan and lavsan-cotton materials were studied. The concentration of the solution during the sorption of the collagen-preserving solution obtained during the sorption process onto the materials, the duration of sorption were studied. The kinetics of the sorption of the collagen solution onto the materials were analyzed using pseudo-first and pseudo-second-order models. The rate constants as a result of sorption were calculated. The compliance of the sorption kinetics with the pseudo-second-order model was determined from the value of the R^2 correlation coefficient. The sorption energy of the collagen solution onto the materials was calculated. The activation energy of the collagen solution during the sorption process is 28,222 kJ/mol for cotton fabric, 35,690 kJ/mol for cotton+lavsan fabric, 41,250 kJ/mol for lavsan fabric and 32,947 kJ/mol for silk fabric. Based on these values, it was determined that the sorption of the collagen solution to fabrics increases in the following sequence: cotton < silk < cotton+lavsan < lavsan.*

Keywords: collagen, textile materials, sorption kinetics.

Введение.

В настоящее время особое внимание уделяется переработке отходов обрабатывающих производств и использованию полученных продуктов в текстильной промышленности [1]. При получении коллагенового



консервирующего раствора в настоящее время разрабатывается частичный гидролиз обрезков кожи, утилизируемых как отходы на кожевенных предприятиях, щелочным раствором, а также разрабатываются новые возможности переработки текстильных материалов с использованием полученного коллагенового консервирующего раствора. В частности, установлено, что при прядении хлопковых волокон, крашении пряж и получении огнестойких материалов коллагеновый консервирующий раствор включается в состав и существенно повышает физико-механические свойства материалов [2, 3, 4, 5, 6]. Это создает возможность изучения механизмов взаимодействия коллагенконсервирующих растворов с текстильными материалами [7].

Кожевенная промышленность производит твердые отходы, в состав которых входят шкуры крупного рогатого скота, мясо и коллаген, которые состоят из SWCF [8, 9, 10, 11]. Однако эффективное крупномасштабное промышленное применение SWCF еще не было широко изучено. Кроме того, утилизация SWCF на основе чистящего порошка для кожи по-прежнему является сложной задачей, поскольку отходы и образующиеся вещества представляют серьезные риски для окружающей среды и экосистемы [12]. Однако SWCF, которые представляют собой химически модифицированные коллагеновые материалы, содержат переменные функции в дополнение к многофункциональным группам чистого коллагена [13, 14, 15, 16].

Эффективность и механизм адсорбции и ее поверхность можно изучать с использованием данных, полученных из изотерм адсорбции и кинетических параметров [17, 18]. В стремлении понять адсорбенты важно предсказать параметры адсорбента и сравнить поведение адсорбентов для различных систем [19]. Это позволяет определить конструкцию адсорбционной системы и понять взаимодействие и процесс между адсорбентами и тяжелыми металлами в равновесных условиях с помощью моделирования изотерм [20]. Адсорбционная способность и возможность вторичной переработки адсорбента зависят от степени взаимодействия адсорбата с адсорбентом через



ковалентные и нековалентные взаимодействия [21]. Известно, что кинетические модели используются для определения механизма процесса сорбции (скорость химической реакции, контроль диффузии и массоперенос) [22]. В последние годы использовались различные кинетические модели, включая псевдопервопорядка, псевдвторого порядка и несколько других [23]. В литературе широко используются два типа кинетических моделей, и процессы, контролируемые диффузией, совместимы с кинетическими моделями первого и второго порядка, используемыми для описания процесса [24]. Необработанные альгинатные композиты (А), альгинат-модифицированные коллагеновые композиты 2:1 (АС1) и альгинат-модифицированные коллагеновые композиты 3:1 (АС2) были успешно синтезированы, охарактеризованы и, как было обнаружено, обладают способностью удалять Рb (II) из исследуемых водных растворов [25].

Разработка антибактериальных и каталитических адсорбентов является идеальным направлением для одновременного удаления антибиотиков, устойчивых к антибиотикам бактерий и ионов тяжелых металлов из сточных вод. Здесь был приготовлен пористый и возобновляемый аэрогель в качестве легкого адсорбента с использованием коллагеновых волокон (CF), которые экономично получают в кожевенной промышленности. Кроме того, были выбраны комплексы ионов Fe^{3+} с модифицированными галловой кислотой наночастицами серебра ($GA@AgNP$) для достаточного сшивания иерархической структуры CF на основе координированного комплексообразования ионов с модифицированными галловой кислотой наночастицами серебра ($GA@AgNP$), что приводит к хорошим механическим свойствам полученного аэрогеля ($AgNP/Fe@CF$) [26].

Бифункциональные аэрогели были разработаны и синтезированы с использованием углеродных точек, сшитых с отходами коллагена, полиэтиленimina (ПЭИ) и альдегидцеллюлозных нановолокон.

Сорбционные свойства Cr^{6+} изучались с помощью методологии сорбционных экспериментов (RSM). Кинетическая модель (модель



псевдвторого порядка) и изотермическая модель (модель Ленгмюра) хорошо соответствуют процессу адсорбции Cr^{6+} [27].

Коллагеновые волокна (CF), полученные из отходов, богаты $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_3$, $-\text{OH}$ и другими активными группами и использовались для адсорбции Cr^{6+} посредством хелатирования [28, 29, 30]. Хотя адсорбционная способность CF для ионов тяжелых металлов слаба, ее можно оптимизировать, модифицируя функциональные группы или комбинируя с другими материалами [31].

CF был привит на пектин из яблочных выжимок (APPN), и был получен функциональный гибридный биокompозитный адсорбент с максимальной адсорбционной емкостью 171,79 и 177,27 $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$ для Ti^{4+} и As^{5+} [32].

Сорбенты и биосорбенты использовались для очистки загрязненных водных сточных вод, содержащих красители/органические вещества или ионы металлов [33]. Были изучены адсорбционное равновесие и кинетика однокомпонентных водных растворов реактивных красителей на активированном угле [34].

Эффективный магнитный композитный сорбент был синтезирован путем включения наночастиц магнетита в полимерную матрицу (полученную путем поликонденсации формальдегида гуанидина и аминоксинафталинсульфоновой кислоты). УФ-облучение позволяет увеличить адсорбционную способность урана и улучшить кинетику поглощения. Уравнения Темкина соответствовали изотермам сорбции, а кинетика поглощения была успешно смоделирована с помощью уравнения скорости псевдопервого порядка [35]. На основе простого синтеза хитозана, модифицированного этилацетоацетатом, и композитных гранул альгината с функционализированной поверхностью (EAA-MCSA).

Химическая модификация альгината натрия была выполнена для прививки аминотиокарбаматного фрагмента ($-\text{OCSNHNH}$) вдоль линейных цепей исходного полисахарида для повышения селективности и специфичности. Было обнаружено, что EAA-MCSA является лучшим



сорбентом для адсорбционной очистки Cu(II) из разбавленных сточных вод. На основании данных сорбции получены значения псевдovторого порядка $2 = 0,99$, $q_{\text{exp}} \approx q_e$, $\theta = 85,25$ мг/г, $k_2 = 0,45-1,17 \times 10^{-2}$ г/мг·мин⁻¹ и изотерма адсорбции Ленгмюра ($R^2 = 0,99$, $q_m = 390,21$ мг/г при 298 К и pH =6,0, $KL = 0,44-0,49 \times 10^{-2}$) [36].

Для изучения кинетики и изотермы сорбции ионов Cu²⁺ в искусственных растворах ионита на основе вермикулита брали 4 г/л ионита со статической обменной емкостью 2,5 мг·экв/г по HCl и готовили растворы ионов Cu²⁺ с различной концентрацией 0,01, 0,0125, 0,025 и 0,05 моль·л⁻¹. Исследовали сорбцию 100 мл при температурах 293, 303 и 313 К до достижения равновесия (до 18 часов) [37, 38]. Используя кинетическую модель псевдопервого порядка, уравнение реакции хитозана и к-каррагинана было подобрано с использованием графиков молекулярной массы к-каррагинана в зависимости от времени нагревания, которые показали сильную зависимость от времени нагревания [39].

В периодическом эксперименте было проведено удаление Cr (VI) при рабочей температуре 500 °С и скорости нагрева 10 °С/мин в течение различных промежутков времени (2,5, 5, 10, 15, 30, 60, 120 и 240 мин). Максимальный процент удаления Cr (VI) при концентрации металла 1 ppm, продемонстрированный нелинейными изотермами адсорбции (модели Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радускевича и Темкина) и кинетическими моделями (псевдопервого порядка, псевдovторого порядка), составляет 97,88%. Анализ порядка (n-порядка и внутричастичной диффузии) проводился с использованием надстройки Microsoft Excel Solver.

Согласно результатам, модель изотермы Ленгмюра ($R^2 = 0,999$) и модели псевдovторого порядка подходят для описания адсорбции монослоя и кинетики процесса соответственно. Исследования показали, что максимальная адсорбционная способность биоугля при адсорбции составляет 186,94 мг/г [40].

Теоретические исследования

В настоящее время переработка природных полимеров в текстильные материалы и изучение их физико-химических свойств представляют большой интерес в обрабатывающей промышленности. Целью исследования является определение кинетики сорбции растворов, консервирующих коллаген, на текстильные материалы и разработка оптимальных условий их воздействия.

В этом исследовании использовались следующие кинетические модели.

Кинетическая модель псевдопервого порядка

Кинетическая модель псевдопервого порядка представлена следующим уравнением Лагергрена:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2,303} t \quad [1.1].$$

В этом уравнении: q_t и q_e — количества коллагена, адсорбированного на сорбенте в заданное время и равновесии (г/г). k_1 — константа скорости (сек⁻¹) процесса сорбции первого порядка, а угловое значение наклона точки пересечения на линейном графике зависимости $\log(q_e - q_t)$ от времени t равно $k_1/2,303$.

Кинетическая модель псевдовторого порядка

Кинетическая модель псевдовторого порядка представлена следующим уравнением.

$$\frac{\tau}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \left(\frac{1}{q_e}\right) \tau [1.2].$$

Начальная скорость сорбции ($t=0$) находится следующим образом:

$$h = k_2 q_e^2 \quad [1.3].$$

В приведенных выше уравнениях k_2 — константа скорости, q_e — количество раствора коллагена, поглощенное определенной массой сорбента (г/г), а τ — время (сек).

Энергия активации в процессе сорбции

Изменение значения константы адсорбции в растворах под влиянием температуры было выражено Аррениусом через следующее уравнение [41, 42, 43].

$$\ln k_2 = \ln A_0 - E_a / RT \quad [1.4].$$

Где: A_0 — экспоненциальный множитель, E_a — энергия активации, а k_2 (г/г сек) — псевдоторая кинетическая константа при разных температурах. Чтобы найти энергию активации E_a , строится график $\ln k_2$ против $1/T$.

Материалы и методы

Для изучения кинетики адсорбции использовали 10-40% растворы коллагенового раствора, не менее 0,2-0,3 г материалов и полимерные материалы, содержащие amino-, гидроксильные и карбоксильные группы.

Сорбция раствора консерванта коллагена на текстильных материалах

Для определения адсорбции раствора коллагена на текстильных материалах была организована сорбция 10%, 20%, 30%, 40% растворов на хлопковых, хлопково-лавсановых, лавсановых и шелковых материалах через определенные промежутки времени 5, 10, 15, 20, 25 (секунд), 303, 313 и 323 К.

$$Q_e = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100\% \text{ g/g}$$

Где: Q_e – количество коллагена, впитавшегося в ткань в г/г, m_0 – масса материала (г), m_1 – масса коллагена после впитывания в материал (г).

Кинетику процесса сорбции раствора коллагена на хлопчатобумажных, хлопчатобумажно-лавсановых, лавсановых и шелковых тканях, рассчитанную в ходе эксперимента, оценивали путем нахождения кинетических параметров псевдопервого порядка из графика, построенного в зависимости от $\log(q_e - qt)$ и времени t на рисунке 1.

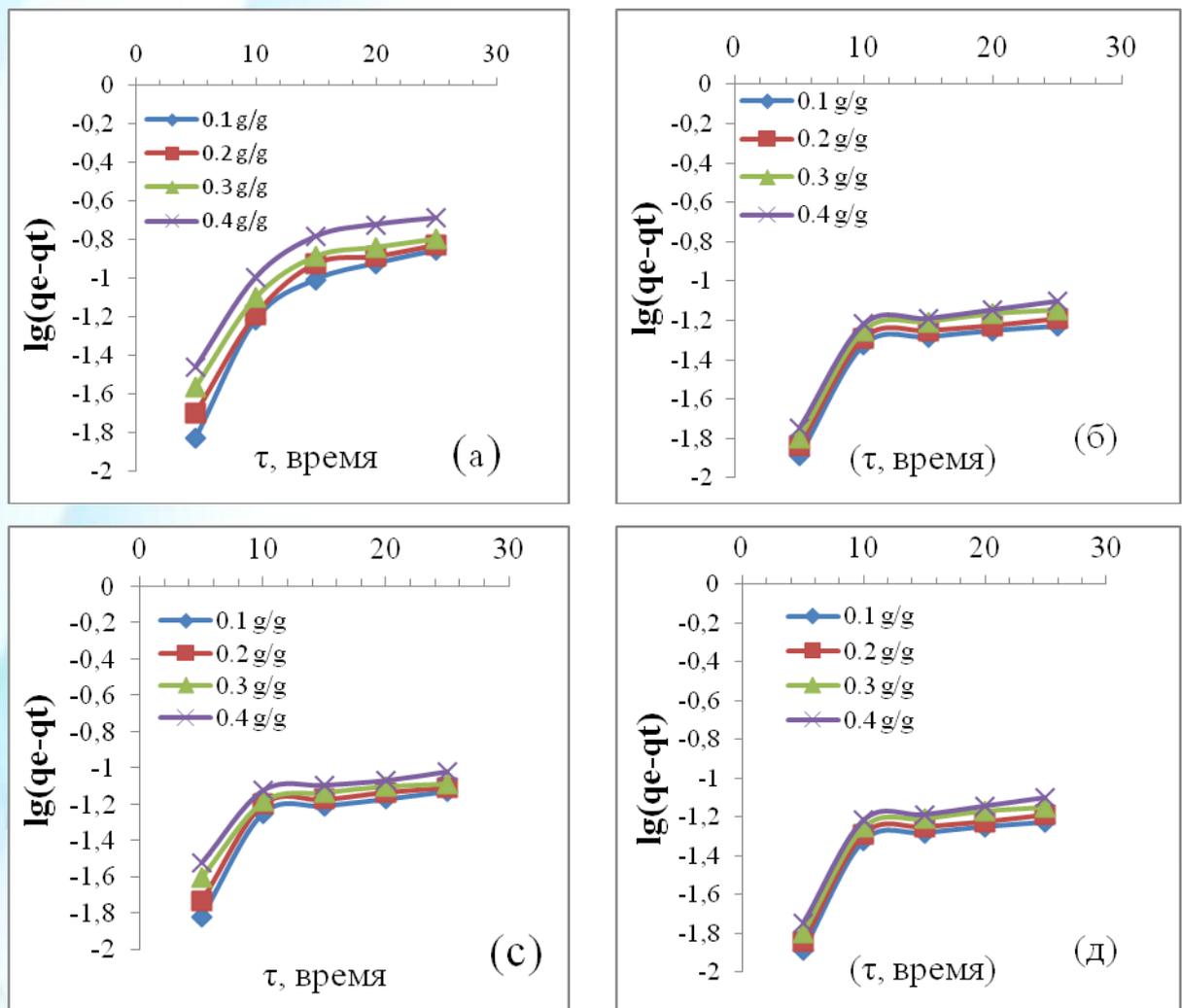


Рисунок 1: Кинетическая модель псевдопервого порядка сорбции коллагена на материалах. 323 К, для (а) хлопка, (б) хлопка + лавсана, (с) лавсана, (д) шелковых материалов.

Кинетика процесса сорбции раствора коллагена на хлопчатобумажных, хлопчатобумажных+лавсановых, лавсановых и шелковых тканях. Кинетические параметры псевдовторого порядка оценивались по графику t/q_e и τ от времени на рисунке 2.

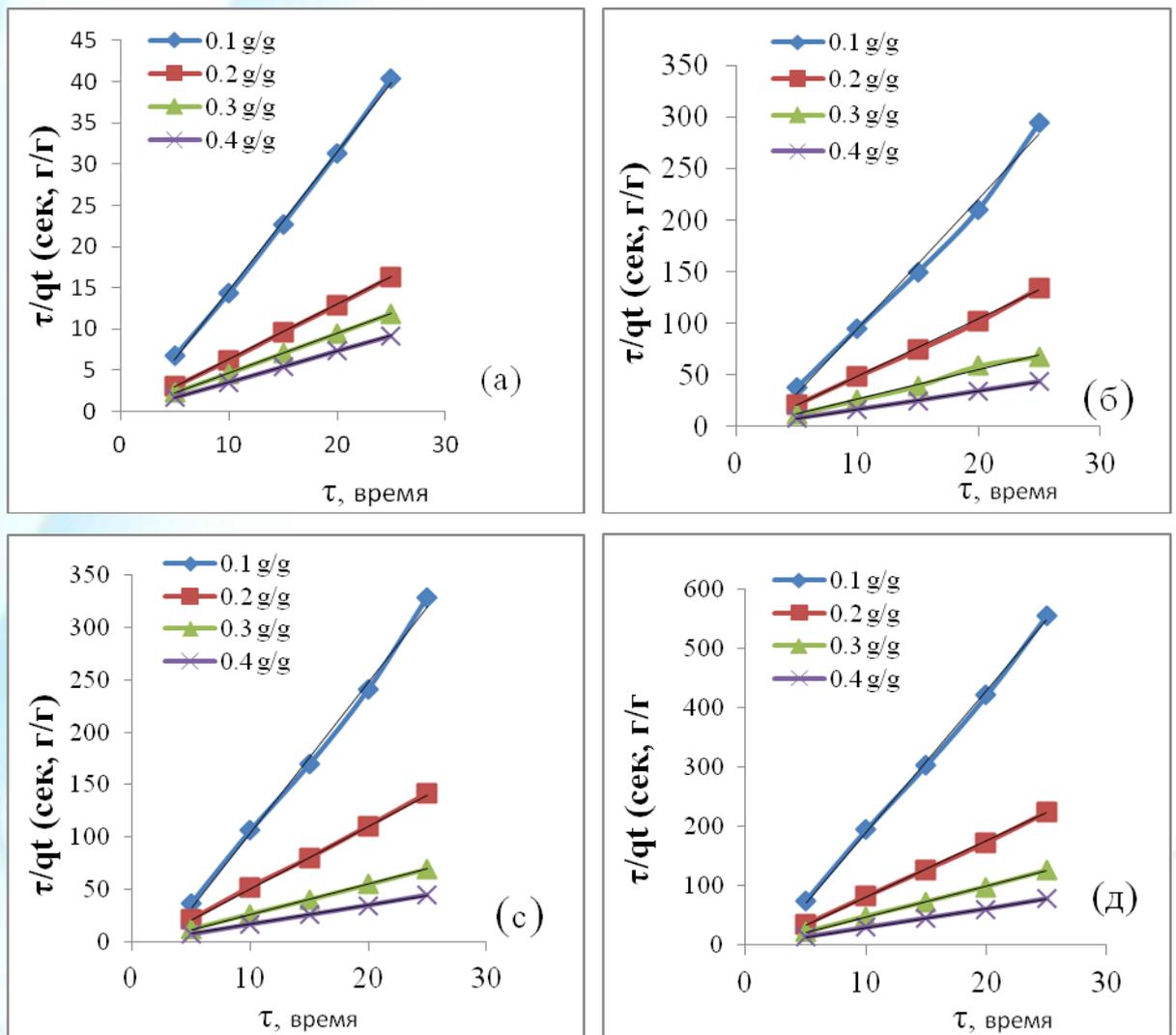


Рисунок 2: Кинетическая модель псевдвторого порядка сорбции коллагена на материалах. (323 К), для (а) хлопка, (б) хлопка + лавсана, (в) лавсана, (г) шелковых материалов.

Кинетика процесса сорбции коллагена на хлопчатобумажных, хлопчатобумажных + лавсановых, лавсановых и шелковых тканях оценивалась с использованием констант скорости (k_1 и k_2) и коэффициентов корреляции (R^2), полученных с использованием рисунков 2 и 3 выше.

Адсорбция коллагена на хлопчатобумажных, хлопчатобумажных + лавсановых, лавсановых и шелковых тканях частично увеличивалась с температурой в диапазоне 303-323 К. Был построен график $\ln k_2$ и $1/T$ для нахождения энергии активации в процессе сорбции (рисунок 3).

На рисунке 3 и ниже в таблице 3 представлены рассчитанные значения энергии активации сорбции раствора коллагена на хлопчатобумажных, хлопчатобумажных + лавсановых, лавсановых и шелковых тканях.

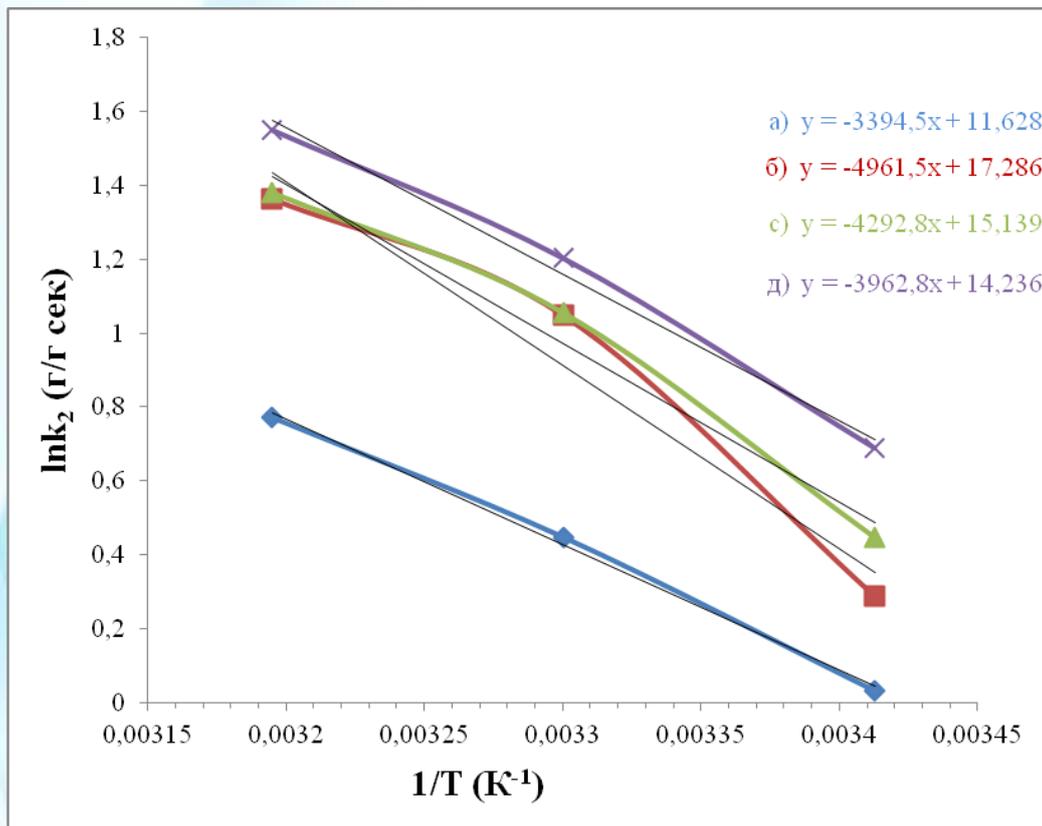


Рисунок 3. График зависимости $\ln k_2$ и $1/T$ для расчета энергии активации адсорбции. (323 К), для (а) хлопка, (б) хлопка + лавсана, (в) лавсана, (г) шелковых материалов.

Результаты параметров модели первого порядка показали, что впитывание раствора коллагена в материал происходило быстро в начальный момент времени, а затем скорость сорбции замедлялась. Это можно объяснить накоплением коллагена на поверхности адсорбента и возникновением равновесия между макромолекулами.

На графике процесса сорбции второго порядка (рисунок 3) коэффициент корреляции близок к единице по сравнению с коэффициентом корреляции адсорбции первого порядка (R^2), а значения кинетических параметров в таблице свидетельствуют о том, что адсорбция раствора коллагена на материалах подчиняется кинетике адсорбции второго порядка.

Это свидетельствует о том, что на процесс сорбции влияют природа коллагена и функциональные группы в материалах.

Из данной таблицы видно, что кинетика процесса сорбции раствора коллагена в хлопчатобумажных, хлопчатобумажно-лавсановых, лавсановых и шелковых тканях близка к модели первого порядка, а данные модели второго порядка близки к интегральным.

Таблица. Кинетические параметры и энергия активации сорбции раствора коллагена на хлопчатобумажных, хлопко-лавсановых, лавсановых и шелковых тканях.

Полимер	Сорбен	Первоначально конц. (г/г)	Псевдо-первый ок			Псевдо-второго порядка			
			Равновесная на адсорбции q_e (г/г)	k_1 (сек ⁻¹)	R^2	Равновесная на адсорбции q_e (г/г)	k_2 (г/г ⁻¹ сек ⁻¹)	R^2	E_a кЖ/ моль
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коллаген	Хлопо	0,1	0,76	0,102	0,80	0,2970	2,589	0,999	28,222
		0,2	1,68	0,094	0,80	0,7494	2,252	0,999	
		0,3	2,265	0,082	0,80	1,0355	2,183	0,999	
		0,4	2,94	0,083	0,80	1,3401	1,630	0,999	
	Среднее значени k_1 и k_2		0,0909			2,1639			
		0,1	0,15	0,055	0,75	0,0796	5,116	0,992	



хлопок	0,2	0,255	0,049	0,75		4,084	0,997	35,690	
					0,1791				
	лавсан	0,3	0,44	0,038	0,74		3,564		0,991
						0,3476			
	0,4	0,66	0,034	0,75		2,888	0,999		
					0,5611				
Среднее значение									
k ₁ и k ₂		0,0448			3,9137				
Лавсан	0,1	0,15	0,067	0,65	0,0695	5,299	0,996	41,250	
	0,2	0,255	0,060	0,63	0,1676	4,137	0,999		
	0,3	0,44	0,051	0,66	0,3482	3,533	0,999		
	0,4	0,66	0,048	0,68	0,5536	2,942	0,999		
Среднее значение									
k ₁ и k ₂		0,0569			3,9780				
Щелк	0,1	0,1315	0,063	0,62	0,0665	6,755	0,999	32,947	
	0,2	0,2225	0,062	0,63	0,1503	4,877	0,999		
	0,3	0,3215	0,063	0,64	0,2402	4,006	0,999		
	0,4	0,4635	0,062	0,66	0,3731	3,233	0,999		
Среднее значение									
k ₁ и k ₂		0,0632			4,7182				

Заключение



В данных кинетических исследованиях в качестве сорбентов использовались хлопчатобумажные, хлопчатобумажные + лавсановые, лавсановые и шелковые ткани, а изучение сорбции раствора коллагена при различных начальных концентрациях и температурах показало, что значения кинетических параметров этого процесса свидетельствуют о том, что поглощение раствора коллагена хлопчатобумажными ($R^2=0,804-0,999$), хлопчатобумажными + лавсановыми ($R^2=0,753-0,9922$), лавсановыми ($R^2=0,654-0,9961$) и шелковыми ($R^2=0,625-0,9995$) тканями протекает по законам кинетики адсорбции второго порядка. Это свидетельствует о том, что на сорбцию раствора коллагена хлопчатобумажными, хлопчатобумажными + лавсановыми, лавсановыми и шелковыми тканями влияет не только раствор коллагена, но и функциональные группы в составе сорбента. Энергия активации раствора коллагена в процессе сорбции составляет для хлопчатобумажной ткани 28222 кДж/моль, для ткани хлопок+лавсан 35690 кДж/моль, для ткани лавсан 41250 кДж/моль и для шелковой ткани 32947 кДж/моль. На основании полученных значений определено, что сорбция раствора коллагена тканями увеличивается в следующем ряду: хлопок < шелк < хлопок+лавсан < лавсан. Сорбция раствора коллагена основана на образовании межмолекулярных водородных связей между функциональными группами коллагена и функциональными группами сорбента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рейимов А.Ф., Абдусаматова Д.О. Получение и применение раствора коллагена для обработки текстильного материала. Россия Universum: химия и биология: № 11(101) 2022. -С. 17-21
2. Отенов И.А., Рафиков А.С., Reyimov A.F., Муродов Т.Б. Полимер композиция ёрдамида ўрта толали пахта йигирилган ипнинг физик-механик кўрсаткичларини яхшилаш//Ўзбекистон тўқимачилик журнали. Илмий-техникавий журнал. 2022, №1. 132-138 б.
3. Rafikov A.S., Khakimova M.Sh., Fayzullayeva D.A. Reyimov A.F. Microstructure, morphology and strength of cotton yarns sized by collagen



- solution//Cellulose, DOI 10.1007/s10570-020-03450-w19 September 2020. Pages: 10369-10384.
4. Sobirova S.A., Rafikov A.S., Toshpolatov S.Sh., Cherunova I.V., Karimov S.X., Rasulova M.K., Temirova G.I. Kollagen tarkibli shakil berilgan material olish usuli// IXTIROGA PATENT. № ШФЗ 06565
5. Йулдошева О.М., Хакимова М.Ш., Рафииков А.С., Рейимов А.Ф. Коллаген - компонент композиции для огнезащитной обработки текстильных материалов//Россия Universum: Технические науки: № 8(53) 2018. -С. 56-60.
6. Хакимова М.Ш., Рафииков А.С., Садиикова Д.Б., Рейимов А.Ф. Коллаген асосида тўқув жараёни учун охорловчи композиция. Тўқимачилик муаммолари № 3 / 2018. 131-135 б.
7. Rafikov A.S., Yuldosheva O.M., Karimov S.Kh., Khakimova M.Sh., Abdusamatova D.O., Doschanov M.R. Three in one: sizing, grafting and fire retardant treatment for producing fire-resistant textile material// Journal of Industrial Textiles. 2022, Vol. 51(5S) 8925S–8946S
8. B. Chen, F. Long, S. Chen, Y. Cao, X. Pan, Magnetic chitosan biopolymer as a versatile adsorbent for simultaneous and synergistic removal of different sorts of dyestuffs from simulated wastewater, Chem. Eng. J. 385 (2020), 123926, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123926>
9. Y.S Ho, G McKay. Pseudo-second order model for sorption processes// Process Biochemistry. Volume 34, Issue 5, July 1999, Pages 451-465.
10. Xiaoyan Yang, Bushra Al-Duri. Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon// Journal of Colloid and Interface Science. Volume 287, Issue 1, 1 July 2005, Pages 25-34
11. Jean-Pierre Simonin. On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics // Chem. Eng. J., vol. 300, 15 September 2016, Pages 254–263.
12. W. Rudzinski, W. Plazinski, Theoretical description of the kinetics of solute adsorption at heterogeneous solid/solution interfaces: On the possibility of



- distinguishing between the diffusional and the surface reaction kinetics models // Appl. Surf. Sci. 253, 2007, Pages 5827–5840.
13. MurodJurayev ,SuyunKhushvaktov, SunnatBotirov, DavronbekBekchanov, MukhtarjonMukhamediev. Kinetics Of Sorption Of Ca (II) And Mg (II) Ions From Solutions To A New Sulphocathionite // International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 7, (2020), pp. 3395-3401
14. Mohammed F. Hamza A.B, Eric Guibal C, Yuezhou Wei A D, AmrFouda E. Magnetic amino-sulfonic dual sorbent for uranyl sorption from aqueous solutions – Influence of light irradiation on sorption properties// Chemical Engineering Journal. Volume 456, 15 January 2023, 141099
15. ObaidurahmanAbid A, Ejaz Ahmed A, HamzaShehzad A B, Ahsan Sharif a, Zahoor H. Farooqi A, Zhirong Liu B, Limin Zhou B, JinboOuyang B, Robina Begum A, Ahmad Irfan C, AijazRasoolChaudhry D, Muhammad Imran Din A. Competitive recovery of copper ions using ethyl acetoacetate modified chitosan/organo-functionalized alginate hydrogel beads: kinetics and isothermal sorption studies// Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. Volume 675, 20 October 2023, 132019
16. БекчановД.Ж., ТурсунмуратовО.Х. Vermikulitasosidaolinganiotgami (II) kationlariningyutilishkinetikasiningtahlili// O'zMUxabarlar. May, 2023
17. Турсунмуратов, О. Х., Турғун, Ф., Хуррамова, Қ. (2023). Вермикулитасосидаолинганионитганикел (II) ионларисорбциясининг псевдо-биринчива псевдо-иккинчи тартибли кинетик моделлари. Academic research in educationa lsciences, 4(1), 413-421.
18. Рафиков А.С., Абдусаматова Д.О. Рейимов А.Ф. Получение и свойства раствора коллагена. Сборник материалов XXIII Международного научно-практического форума “Smartex-2020”Иваново-С. 217-221
19. Mahdiyar Shahbazi, RammileEttelaie, Ghadir Rajabzadeh. Kinetic study of κ-carrageenan degradation and its impact on mechanical and structural properties of chitosan/κ-carrageenan film.Carbohydrate Polymers// Volume 142, 20 May 2016, Pages 167-176



20. Abdul Ahad Xon, Salmon Rizo Naqvi, Imtiaz Ali, Muazzam Arshad, Hamad Al-Mohamadi, Umayr Sikandar. Algal-derived biochar as an efficient adsorbent for removal of Cr (VI) in textile industry wastewater: Non-linear isotherm, kinetics and ANN studies// *Chemosphere* Volume 316, March 2023, 137826
21. Srivastava, V.C., Swamy, M.M., Mall, I.D., Prasad, B., Mishra, I.M., 2006. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 272, 89–104.
22. Gusain, D., Srivastava, V., Sillanpää, M., Sharma, Y.C., 2016. Kinetics and isotherm study on adsorption of chromium on nano crystalline iron oxide/hydroxide: linear and nonlinear analysis of isotherm and kinetic parameters. *Res. Chem. Intermed.* 42, 7133–7151.
23. Gimbert, F., Morin-Crini, N., Renault, F., Badot, P.-M., Crini, G., 2008. Adsorption isotherm models for dye removal by cationized starch-based material in a single component system: error analysis. *J. Hazard Mater.* 157, 34–46.
24. Chen, X., Hossain, M.F., Duan, C., Lu, J., Tsang, Y.F., Islam, M.S., Zhou, Y., 2022. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - a review. *Chemosphere* 307, 135545.
25. Valizadeh Derakhshan, M., Nasernejad, B., Dadvar, M., Hamidi, M., 2014. Pretreatment and kinetics of oil extraction from algae for biodiesel production. *Asia Pac. J. Chem. Eng.* 9, 629–637. <https://doi.org/10.1002/apj.1790>.
26. Mgoma, S.T., Basitere, M., Mshayisa, V.V., 2021. Kinetics and thermodynamics of oil extraction from South African hass avocados using hexane as a solvent. *South Afr. J. Chem. Eng.* 37, 244–251.
27. Moussa Abbas, Zahia Harrache, Mohamed Trar. (2019). Removal of gentian violet in aqueous solution by activated carbon equilibrium, kinetics, and thermodynamic study. *Adsorption Science & Technology*. Vol 37, Issue 7-8, 0(0) 1.
28. Erkan Uğurlu., Önder Duysak., Gulfeza Kardaş., Selin Sayin., Eyüp İlker Saygili., Serdar Dog'an. Alginate modified collagen for rapid, durable and



- effective biosorption of Pb (II) ions from an aqueous solution// *Regional Studies in Marine Science*. Volume 65, 10 December 2023, 103091
29. Rui Wang., Peng Zhao., Ruiquan Yu., Jing Jiang., Ruifeng Liang., Gongyan Liu . Cost-efficient collagen fibrous aerogel cross-linked by Fe (III) /silver nanoparticle complexes for simultaneously degrading antibiotics, eliminating antibiotic-resistant bacteria, and adsorbing heavy metal ions from wastewater// *Separation and Purification Technology*. Volume 303, 15 December 2022, 122209
30. Limin Jing, Shuo Yang, Xia Li, Yifei Jiang, Jiang Lou, Zhuqing Liu, Qijun Ding, Wenjia Han. Effective adsorption and sensitive detection of Cr⁶⁺ by degradable collagen-based porous fluorescent aerogel// *Industrial Crops and Products* . volume 182, August 2022, 114882
31. Ahn, H., Gong, D.J., Lee, H.H., Seo, J.Y., Song, K.M., Eom, S.J., Yeo, S.Y., 2021. Mechanical properties of porcine and fish skin-based collagen and conjugated collagen fibers. *Polymers* 13, 2151.
32. Ghazanfari, S., Driessen-Mol, A., Bouten, C.V., Baaijens, F.P., 2016. Modulation of collagen fiber orientation by strain-controlled enzymatic degradation. *Acta Biomater.* 35, 118–126.
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2016.02.033>
33. Li, Q.P., Zhao, C.S., Han, W.J., 2008. Study on collagen fiber in papermaking. In: *Proceedings of International Conference on Pulping, Papermaking and Biotechnology 2008: ICPPB 08*, 2, pp. 411–414. ISBN 978-988-17682-2-3
34. Wang, X.C., Bu, Q.Q., Qiang, T.T., Luo, M., 2013. Study on the adsorption behavior of acid dyes on collagen fiber. *Mater. Sci. Forum* 743–744, 759–767.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.743-744.759>
35. Mondal, H., Karmakar, M., Chattopadhyay, P.K., Halder, A., Singha, N.R., 2021. Scale-up one-pot synthesis of waste collagen and apple pomace pectin incorporated pentapolymer biocomposites: roles of waste collagen for elevations of properties and unary/ ternary removals of Ti(IV), As(V), and V(V). *J. Hazard. Mater.* 409, 124873 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124873>.



36. Cao, S., Song, J., Li, H., Wang, K., Li, Y., Li, Y., Lu, F., Liu, B., 2020. Improving characteristics of biochar produced from collagen-containing solid wastes based on protease application in leather production. *Waste Manag.* 105, 531–539. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.043>.
37. Pei, Y., Chu, S., Zheng, Y., Zhang, J., Liu, H., Zheng, X., Tang, K., 2019. Dissolution of collagen fibers from tannery solid wastes in 1-Allyl-3-methylimidazolium chloride and modulation of regenerative morphology. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 7, 2530–2537.
38. Gomes C.S., Repke J., Meyer, M., 2019. Diauxie during biogas production from collagen-based substrates. *Renew. Energ.* 141, 20–27.
39. Dai, G., Zhang, Z., Du, W., Li, Z., Gao, W., Li, L., 2019. Conversion of skin collagen fibrous material waste to an oil sorbent with pH-responsive switchable wettability for high-efficiency separation of oil/water emulsions. *J. Clean. Prod.* 226, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.287>.
40. Hittini, W., Mourad, A.I., Abu-Jdayil, B., 2019. Cleaner production of thermal insulation boards utilizing buffing dust waste. *J. Clean. Prod.* 236, 117603 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117603>
41. Dong, C., Lv, Y., 2016. Application of collagen scaffold in tissue engineering: recent advances and new perspectives. *Polymers* 8, 42. <https://doi.org/10.3390/polym8020042>.
42. Wu, J., Liu, F., Yu, Z., Ma, Y., Goff, H.D., Ma, J., Zhong, F., 2020. Facile preparation of collagen fiber–glycerol-carboxymethyl cellulose composite film by immersing method. *Carbohydr. Polym.* 229, 115429 <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115429>
43. Chandan Roy, Arnab Dutta, Manas Mahapatra, Mrinmoy Karmakar, Quvonch Sankar Deb Roy, Madhushri Mitra, Pijush Kanti Chattopadhyay, Nayan Ranjan Singha. Collagenic waste and rubber based resin-cured biocomposite adsorbent for high-performance removal(s) of Hg(II), safranin, and brilliant cresyl blue: A cost-friendly waste management approach // *Journal of Hazardous Materials*. Volume 369, 5 May 2019, Pages 199-213.