

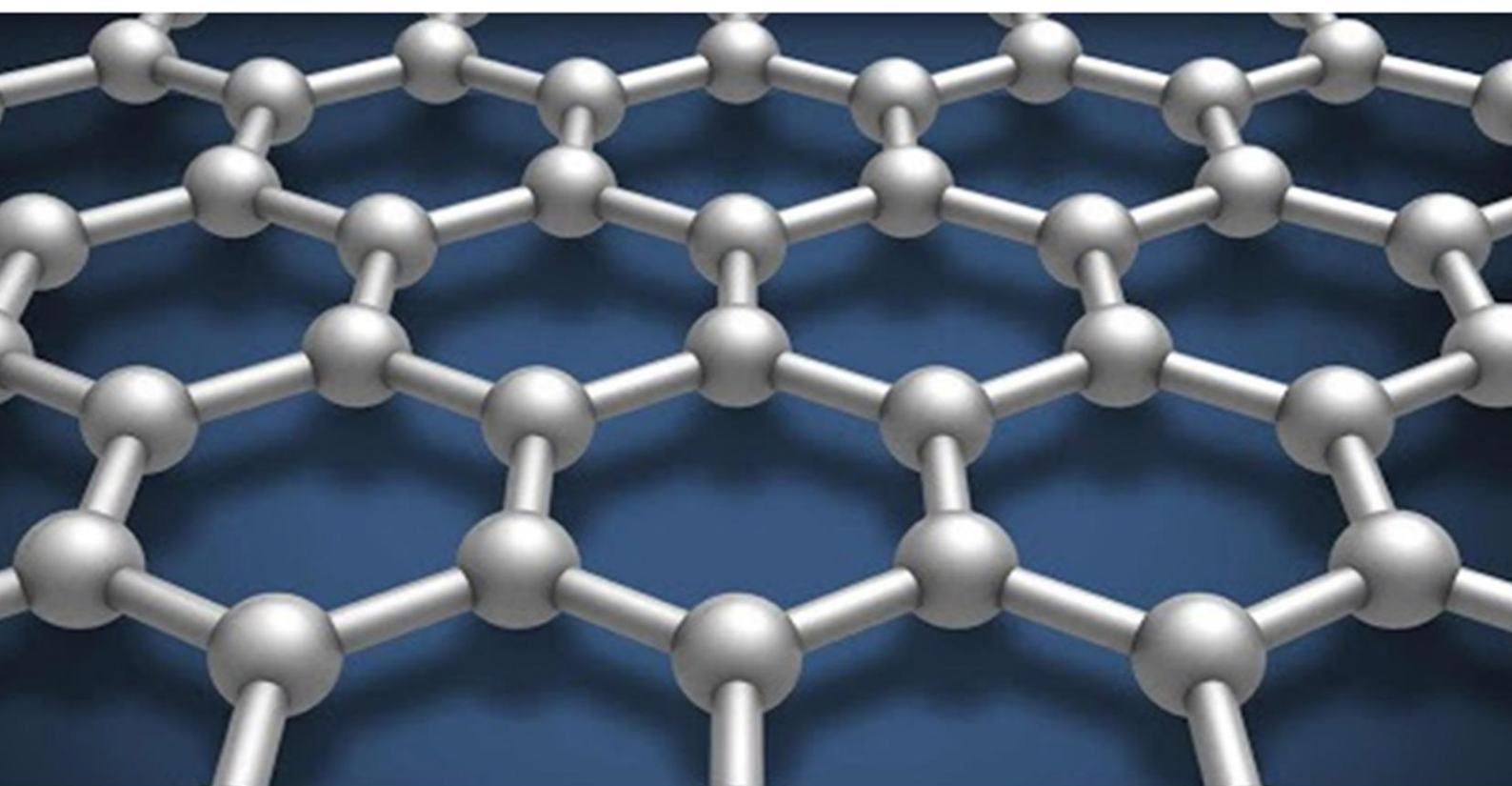
ISSN 2091-5527

№ 3/2026

O'zbekiston

Kompozitsion **M**ateriallar

Ilmiy-texnikaviy va amaliy jurnali



Узбекский научно-технический и производственный журнал
Композиционные материалы

УДК 621.893:677.21

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ХЛОПКОМ-СЫРЦОМ

Негматов Сайибжан Садыкович

*д.т.н., проф., академик АН РУз, заслуженный деятель науки РУз,
научный руководитель ГУ «Фан ва тараккиёт» при ТГТУ им. И.Каримова*

Аннотация. В статье приведены теоретические основы контактного взаимодействия антифрикционных композиционных полимерных материалов с хлопком-сырцом в условиях трения и износа рабочих органов хлопковых машин и механизмов. В результате выявлено, что контактное взаимодействие антифрикционных композиционных полимерных материалов с хлопком-сырцом подтверждает применимость молекулярно-механо-электрической теории трения.

Ключевые слова: коэффициент, трения, контактного взаимодействия, твердых тел, молекулярно-механическая теория, формула, сила трения, полимер, хлопка-сырца, волокна, поверхность, композиционный материал.

Введение. В настоящее время во всем мире наблюдается высокий спрос на полимерные материалы и покрытия, обладающие антифрикционными, износостойкими и высокими физико-механическими свойствами. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка современных и усовершенствованных технологий их получения. Антифрикционно-износостойкие и антифрикционно-электротермические композиционные полимерные материалы широко применяются в машиностроении, металлургии, нефтегазовой и других отраслях промышленности.

Важное научное и практическое значение имеет создание методологических основ определения антифрикционных свойств композиционных полимерных материалов, используемых в машиностроении, а также совершенствование технологий получения покрытий, работающих во взаимодействии с хлопком-сырцом и другими волокнистыми материалами.

Как известно, контактное взаимодействие твердых тел – это многофакторный процесс, сопровождаемый достаточно сложными механохимическими и физическими явлениями, вызванными внешними и внутренними условиями материальной среды. Оно имеет различную природу даже для одной пары твердых тел в зависимости от условий контакта и среды. Однако многообразие условий контактного взаимодействия твердых тел не означает, что для определенных процессов контактного взаимодействия твердых тел, в том числе и композиционных полимерных материалов, не могут быть получены вполне

удовлетворительные закономерности [1].

Объект и методика исследования. В наиболее ранних исследованиях контактного взаимодействия твердых тел в основу изучения было положено рассмотрение взаимодействия шероховатых поверхностей твердых, абсолютно жестких тел, т.е. в них преобладали чисто механические представления. На основе этого представления впервые была сформулирована гипотеза о механической природе контактного взаимодействия твердых тел, которая получила дальнейшее развитие в работах [2].

По мере развития исследований в этой области была выдвинута гипотеза о преобладании сил молекулярного притяжения, и что сила трения возрастает с уменьшением шероховатости за счет увеличения молекулярного сцепления между контактирующими телами, являющегося следствием более тесного сближения поверхностей их контакта [2].

Результаты и их обсуждение. В противовес этому появились комбинированные теории. Комбинированная теория, основу которой составляют механические, деформационные представления и соображения о молекулярно-адгезионных взаимодействиях, выдвинута И.В. Крагельским. В дальнейшем он предложил молекулярно-механическую теорию трения, которая нашла наибольшее признание. Согласно этой теории, трение обуславливается, в основном, деформированием тонкого поверхностного слоя материала внедрившимися неровностями и сопротивлением разрушению пленок, покрывающих тела. Теория основывается на предположении, что при контактировании тел всегда имеет место

относительное внедрение тел [3].

В соответствии с молекулярно-механической теорией, силы трения возникают не по всей площади контакта, а лишь в отдельных контактных зонах, то есть на фактической площади контакта (ФПК). Равнодействующая этих сил представляет собой суммарную силу трения. При этом трение может осуществляться за счёт взаимного внедрения, молекулярного сцепления и механического зацепления контактирующих поверхностей [3].

Величина силы трения представляет собой сумму двух составляющих: молекулярной и механической [3]:

$$F = F_{\text{мол}} + F_{\text{мех}}$$

Коэффициент трения, согласно молекулярно-механической теории, выражается трехчленной зависимостью [2]:

$$f = \frac{\tau_0}{P_r} + \beta + \kappa \alpha \sqrt{\frac{h}{R}},$$

где, τ_0 – удельная сила молекулярного взаимодействия;

P_r – фактическое давление;

β – коэффициент, характеризующий увеличение прочности на срез при росте нормального давления;

κ – коэффициент, зависящий от вида контакта;

α – эмпирический коэффициент;

h – глубина внедрения неровности поверхности;

R – радиус внедрения неровности поверхности.

В дальнейшее развитие молекулярно-механической теории трения значительный вклад внесли Н.М. Михин, Н.Б. Демкин и др. Они показали, что в процессе контактного взаимодействия твердых тел существенную роль играет не только геометрия поверхностей контактирующих тел и ФПК, а, следовательно, и деформационная составляющая сил трения [4, 5].

Во всех рассмотренных работах при изучении коэффициента трения ограничиваются определением его молекулярной и механической составляющих. При этом не учитываются электрические явления, возникающие при контактном взаимодействии двух соприкасающихся тел. Однако электрическое состояние поверхностей трения играет важную роль при контакте двух металлов, металла с полупроводником, металла с диэлектриком, а также при контакте двух диэлектриков, к которым относятся полимер и хлопок-сырец [6].

Анализ условий эксплуатации основных рабочих органов машин и механизмов,

предназначенные для комплексной механизации процессов уборки, транспортировки и переработки хлопка-сырца показывает, что они имеют свои общие и специфические недостатки. Одним из общих недостатков является возможность загорания хлопка-сырца при соударении с твердыми и тяжелыми примесями, а также из-за возникновения статического электричества в зоне контакта в паре хлопок-металл, приводящей к повышению коэффициента трения при взаимодействии с хлопком-сырцом [7].

Как известно, рабочие органы машин и механизмов непосредственно соприкасаются и постоянно находятся в контакте с хлопком-сырцом. Хлопок-сырец электризуется при трении с полимерами и имеет сравнительно легкую воспламеняемость и задириные свойства. Поэтому при выборе полимерных материалов для изготовления деталей рабочих органов этих машин необходимо учитывать природу и закономерности взаимодействия их с хлопком-сырцом, характер изнашивания, электризации и т.п. [8].

Впервые исследования процесса контактного взаимодействия волокнистых материалов с различными конструкционными материалами проведены А.Ю. Ишлинским и И.В. Крагельским [4].

В работе показано, что с увеличением шероховатости поверхности материала растет и коэффициент трения с хлопком. Кроме того, при определении силы натяжения свободной части волокна, соприкасающейся со шпинделем хлопкоуборочной машины, с увеличением коэффициента трения повышается натяжение свободной части хлопкового волокна, т.е. возрастает вероятность обрыва хлопковых волокон при извлечении долек хлопка из коробочек [9].

В основополагающей работе по трению волокнистых материалов с различными поверхностями исследовано влияние ряда факторов на коэффициент трения. Показано, что при увеличении скорости скольжения волокнистых материалов по поверхности конструкций до определённого значения наблюдается рост коэффициента трения, тогда как дальнейшее увеличение скорости приводит к его снижению. Это связано с тем, что при малых скоростях скольжения упругие свойства волокнистой массы обеспечивают достаточное время для её внедрения в поверхность контртела, а при высоких скоростях такое внедрение не происходит. Указанная зависимость коэффициента трения от скорости скольжения объясняется вязкоупругим

характером взаимодействия в системе «металл–хлопок» [9].

Р.Г.Махкамов исследовал взаимодействие хлопка-сырца с поверхностями конструкционных материалов, в частности металлов с точки зрения оптимизации шероховатости поверхности контртела, направленной на снижение механической повреждаемости волокон. Он показал, что сила взаимодействия хлопка-сырца с металлическими поверхностями увеличивается

$$\frac{2R_z}{S} \leq \frac{[N(\mu_2 - \mu_1) + b_1][N(1 + \mu_2\mu_1) + b_2\mu_1] - b_1\sqrt{(1 + \mu_1^2)[(N\mu_2 + b_2)^2 + N^2]} - b_1^2}{[N(1 + \mu_1\mu_2) + b_2\mu_1]^2 - b_1^2},$$

где μ_1 – коэффициент трения волокна и металлической поверхности;

μ_2 – коэффициент внутреннего трения волокон;

N – нормальная нагрузка;

b_1 – цепкость, определяемая главным образом силами адгезии между волокном и металлической поверхностью;

b_2 – цепкость волокон, определяемая силами когезии;

S – шаг микронеровности;

R_z – высота микронеровности.

Предложено оптимальное значение радиуса скругления вершин неровности (100-200 мкм) и материал (титан и хром) для рабочих поверхностей основных органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов, позволяющие снизить силы трения при их взаимодействии с хлопком-сырцом [10].

Автором [11] впервые проведены фундаментальные исследования контактного взаимодействия полимерных и композиционных материалов с хлопком-сырцом. Проведенные исследования показали, что для большинства исследуемых материалов при увеличении скорости скольжения коэффициент трения вначале возрастает и достигает экстремума, а затем при дальнейшем увеличении – снижается. В частности, было выявлено, что зависимость коэффициента трения полимерных материалов с хлопком-сырцом от скорости скольжения при малых и средних давлениях имеет экстремальный характер и описывается формулой И.В. Крагельского [3].

$$f = (a + bv) e^{-cv} + d,$$

а в зоне достаточно больших значений давления имеет сложный характер и описывается формулой Г.Э. Свирского [3]:

$$f = (c_1 + c_2 v^2) e^{-\lambda v} \sin v + cv,$$

где, a , b , c , d , c_1 , c_2 , λ – параметры, определяющие трение;

v – скорость скольжения.

либо за счет микрорезания хлопковых волокон о микровыступы поверхностей, либо за счет увеличения адгезионных взаимодействий, связанных с повышением влажности хлопка-сырца. По его данным, микрорезание волокон интенсивно происходит при радиусе скругления вершин менее чем 100 мкм. Для условий, в которых будет отсутствовать захват волокон микровыступами шероховатой поверхности, он рекомендует следующую формулу [10]:

Также исследовано влияние скорости скольжения и давления в зоне трения в системе полимер-хлопок на величину заряда статического электричества. Установлено, что с ростом скорости и давления величина заряда увеличивается и находится в пределах $12-42 \cdot 10^{-7}$ Кл [3].

Возникновение и накопление электрических зарядов приводит к увеличению напряженности в двойном электрическом слое в контактной зоне, что, в свою очередь, приводит к увеличению электрической составляющей силы трения. Автор объясняет этот факт существованием энергетических зон контактирующих материалов, ориентацией диполей на границе раздела фаз и структурой, неоднородностью контактирующих тел [3].

В ходе исследования процесса контактного взаимодействия композиционных полимерных материалов с волокнистой массой и в развитие молекулярно-механической теории трения С.С. Негматовым была выдвинута молекулярно-механо-электрическая теория контактного взаимодействия, в которой установлено влияние электрической составляющей сил трения на механизм и природу трения. В дальнейшем автором была доказана применимость данной теории при исследовании контактного взаимодействия антифрикционно-износостойких композиционных материалов с хлопком-сырцом [11].

Согласно молекулярно-механо-электрической теории, коэффициент трения состоит из молекулярной ($f_{\text{мол}}$), механической ($f_{\text{мех}}$) и электрической ($f_{\text{элек}}$) составляющих [11]:

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{мех}} + f_{\text{элек}}.$$

Учитывая, что контактное взаимодействие в паре полимер-хлопок осуществляется, в основном, через волокна, участвующие в контакте и обуславливающие увеличение молекулярной составляющей с ростом давления, а также с учетом, что молекулярное взаимодействие происходит на площадях фактического контакта, выведена формула

определения молекулярной составляющей коэффициента трения [11]:

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_0}{P_a} \eta_r + \beta,$$

где τ_0 - сдвиговое сопротивление, Н/м²;

$$\eta_r = P_a \sqrt{\frac{8d}{\pi E' g_1 g_2}} \left[\sqrt{g_2} + m A_{n1}^c (\sqrt{g_1} - \sqrt{g_2}) \right],$$

где d - диаметр волокна;

E' - приведенный модуль упругости системы полимер-хлопок;

m - среднее число семян на единицу площади;

A_{n1}^c - площадь номинального сечения семян;

g_1, g_2 - удельная нагрузка на единицу длины полос контакта;

β - коэффициент упрочения молекулярной связи пьезокоэффициента.

Эта формула устанавливает прямую зависимость между молекулярной составляющей коэффициента трения и относительной фактической площадью контакта (ФПК), которая имеет линейный характер. Она дает возможность аналитически определить молекулярную составляющую коэффициента трения пары полимер-хлопок с учетом электризации [11]:

$$f_{\text{мол}} = (\tau_0/G_s) \rho^{-x} + \beta_2 (1 + \lambda),$$

где, G_s - постоянный коэффициент (Н/м²), зависящий от вида, физического состава и свойств хлопка-сырца и численно равный фактическому давлению на контакте при объемной массе, вдвое больше начальной;

ρ^{-x} - коэффициент, характеризующий

P_a - номинальное давление на контакте, Н/м²;

η_r - относительная площадь контакта пары полимер-хлопок, которая определяется по формуле:

упруго-вязкое поведение контакта, зависящий от вида и физического состава хлопка-сырца, вида и геометрии поверхности материала;

β - пьезо-коэффициент, состоит из двух слагаемых:

$$(\beta = \beta_1 + \beta_2), \quad \beta_2/\beta_1 = \lambda,$$

где, λ - параметр, учитывающий влияние электричества на молекулярную составляющую коэффициента трения.

Величина λ прямо пропорциональна величине заряда электричества, образующегося в зоне контакта.

При изучении механической составляющей силы трения при взаимодействии полимерных материалов с хлопком-сырцом выявлено, что коэффициент трения с ростом неровностей увеличивается. Состояние поверхности существенно влияет на силу трения [12].

Исходя из изложенного, механическая составляющая коэффициента трения для пары полимер-хлопок определяется формулой [11]:

$$f_{\text{мех}} = f_{\text{деф}} + f_{\text{зап}},$$

где $f_{\text{деф}}$ - деформационная составляющая коэффициента;

$f_{\text{зап}}$ - коэффициент трения, зависящий от зацепления волокна за неровности покрытий:

$$f_{\text{деф}} = K \alpha K_1 \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}, \quad f_{\text{зап}} = K \alpha (1 - K_1) \frac{h_{\text{ср}}}{d},$$

где, $h_{\text{ср}}$ - средняя глубина внедрения волокон в микронеровности покрытий;

K_1 - доля твердых веществ в хлопке-сырце, участвующих во взаимодействии с поверхностью полимерного материала;

K - коэффициент, зависящий от вида контакта;

Δh - глубина внедрения твердых неровностей веществ хлопка-сырца в поверхности полимерного покрытия;

r - радиус закругления вершин, образованных в результате взаимодействия хлопка-сырца и полимерного покрытия;

d - диаметр волокна хлопка;

α - эмпирический коэффициент.

Тогда механическая составляющая коэффициента трения будет иметь вид:

Механическая составляющая коэффициента трения, в основном, зависит от величины относительного внедрения (h/r) и условий зацепления волокон ($h_{\text{ср}}/d$), а также от доли твердых веществ K_1 в зоне взаимодействия. Отсюда следует, что при трении волокнистых материалов с полимерным материалом, в отличие от трения твердых тел, возникает процесс зацепления, величина которого определяется условием зацепления ($h_{\text{ср}}/d$) и их долей $(1-K_1)$ [11].

Согласно молекулярно-механо-электрической теории трения, формула коэффициента трения была преобразована в следующий вид [11]:

$$f_{\text{мех}} = K \alpha K_1 \sqrt{\frac{\Delta h}{r}} + K \alpha (1 - K_1) \frac{h_{\text{ср}}}{d}.$$

$$f = \left(\frac{\tau_o}{G_s} \right) \rho^{-x} + \beta(1 + \lambda) + \frac{K\alpha K_1}{2} \left[\sqrt{\frac{\Delta h}{r}} + \left(\frac{1}{K_1} - 1 \right) \frac{h}{d} \right].$$

Используя особенности контактного взаимодействия полимерных материалов с хлопком-сырцом и в соответствии с молекулярно-механо-электрической теорией трения, были выбраны материалы и наполнители для разработки новых устройства для определения антифрикционных свойств композиционных полимерных материалов, позволяющие оценить и направленно изменять и регулировать их свойства.

Заключений. В результате теоретических и практических исследований можно сделать вывод о том, что контактное взаимодействие антифрикционно-износостойких

композиционных полимерных материалов с хлопком-сырцом подтверждает применимость молекулярно-механо-электрической теории трения.

На основе современных представлений о теории взаимодействия двух тел, то есть молекулярно-механо-электрической теории, в дальнейшем возможно проведение исследований по определению оптимальных составов и технологических параметров получения антифрикционно-износостойких композиционных материалов, а также по изучению их физико-механических и триботехнических свойств.

Список литературы

1. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании. Горький: Волго-Вятское кн.изд., 1975. - 280 с.
2. Баженов С.Л. Механика и технология композиционных материалов. - Долгопрудный: Интеллект, 2014. - 328 с.
3. Крагельский И.В. Виноградова И.Э. Коэффициент трения. -М: Машиностроение, 2013.-228 с.
4. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин / Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
5. Демкин Н.Б. Механика и физика фрикционного контакта - Тверь: Твер. гос. техн. ун-т; 2000. - 115 с.
6. Эшкабилов О.Х., Гулямов Г., Абед Н.С. Методы исследования коэффициента трения износа композиционных полимерных материалов на основе полиолефинов // Интеграция дисциплины образования - науки и производства: Матер. Междун. научно-техн. конф. (1 декабря 2018 г.) -Ташкент, 2018. -С. 41-44.
7. Negmatov S.S., Abed N.S., Gulyamov G., Eshkobilov O.Kh. Features of contact interaction of composite polymer materials with raw cotton in the process of friction // Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education: VII International Scientific Conference - IPICSE 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. -Tashkent, TIAME, 2020. - Vol.1030. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012172.
8. Сайпидинов А., Умаров У.Х., Джалалов Т. и др. Исследование формирования ФПК композиционных полимерных материалов при взаимодействии с волокнистой массой // Тезисы докладов П Всесоюзной конференции по композиционным полимерным материалам и их применению в народном хозяйстве. г. Ташкент, 1983. -С. 126-128.
9. Негматов С.С., Абед Н.С., Гулямов Г., Эшкабилов О.Х., Тухташева М.Н. Методика определения величин электростатических зарядов и температур, возникающих в зоне трения в трибосистеме «композит-волокнистые материалы» // Композиционные материалы, –Ташкент, 2019. – №1. –С. 79-81.
10. Махкамов Р.Г. Основы процесса взаимодействия поверхностей твердых тел с волокнистой массой. - Ташкент: Фан, 1979. - 96 с.
11. Негматов С.С. Основы процессов контактного взаимодействия композиционных полимерных материалов с волокнистой массой. -Ташкент: Фан, 1984. - 385 с.
12. Гулямов Г., Абед Н.С., Негматов С.С., Тухташева М.Н., Эшкабилов О.Х. Разработка и усовершенствование устройства для изучения свойств машиностроительных антифрикционно-износостойких антистатически-теплопроводящих композиционных полимерных материалов, работающих в условиях массой // Композиционные материалы. –Ташкент, 2018. – № 2. – С. 117-118.

ОКТАБРЬ

№ 3(108)

2026

СОДЕРЖАНИЕ

1. Химия и физикохимия композиционных материалов и нанокompозитов

Негматов С.С., Юлдашев Н.Б., Негматова К.С., Раупова Д.Н., Исмаилов Р.И., Мусабеков Д.Х., Рахимов Х.Ю. Экспериментальное исследование процесса обезвоживания отработанного масла с применением деэмульгатора «КХД-М-1».....	3
Абед Н.С., Негматов С.С., Бухаров С.Н., Сергиенко В.П., Туляганова В.С., Сохобиддинова Ф.Ж., Эшкobilов О.Х., Джабаров Б.Т., Шамсиева С.С. Научно-технологические принципы создания и применения антиэлектростатических полимерных композитов и покрытий	6
Kucharov A.A., Yusupov F.M., Qurbonov A.R., Xalilov S.U., Toshboboyeva R.A. Sirt faol moddalarning ko'mirni boyitishdagi kolloid-kimyoviy mexanizmlari	11
Sayimova D.Q., Amonov M.R., Ramazonova Z.Y. Sorbentning sorbsion xossasiga kislotalik muhiti va sirt g'ovaklik o'lchamlarini ta'siri	16
Азизова Х.М., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И. Равновесные и кинетические характеристики сорбции меди(II) гранулированным амидоксимным ионитом	19
Umarova S.R., Ibragimova K.S., Xusenov A.Sh., Kiyamova M.I., Raxmanberdiev G. Monokarboksilinulinning sintezi va fizik-kimyoviy xossalarini o'rganish	22
Berdiqulov B.Sh., Ixtiyarova G.A., Safarov A.R. Kaolin va Apis mellifera xitozan asosidagi kompozit biosorbentni sintez qilish va dastlabki tavsiflash	26
Abdurazakov S.E., Maksumova O.S., Fozilova U.J. Metakril kisloata asosida antipiren sintezi	30
Негматов С.С., Юлдашев Н.Б., Негматова К.С., Раупова Д.Н., Мусабеков Д.Х., Рахимов Х.Ю., Исмаилов Р.И. Методики определения физико-химических свойств отработанного масла после обработки композиционным деэмульгатором.....	33

2. Физико-механика и трибология композиционных материалов

Негматов С.С. Теоретические основы контактного взаимодействия антифрикционных композиционных полимерных материалов машиностроительного назначения с хлопком-сырцом	36
Тухтаев Ф.С., Мусоева Д.Н., Мардонова М.З., Махмудова М.М., Негматов С.С. Исследование физико-механических свойств полимер-полимерных композиционных материалов, наполненных минеральными ингредиентами	41
Каримов Ш.А., Алимбабаева З.Л. Темир кукуни асосли юкори ғовакли материал олиш ва унинг хоссалари	44
Yusupova S.Yu., Kamalova D.I. Polipropilen grafit kompozitlarining tuzilishi va mexanik xossalariga grafit miqdorining ta'siri	46
Djabarov B.T. Elektrotexnika sanoati uchun polimer kompozit materiallarning elektrofizik xususiyatlari va ularni boshqarish usullari tadqiqoti	49
Кабулова Л.Б., Оразимбетова Г.Ж. Влияние глинистого сланца на физико-механические свойства и пуццолановую активность композиционного портландцемента	51
Тилабов Б.К. Анализ состава, свойств и структуры сталей, чугунов и сплавов и их термическая обработка	53
Axmedova M.F., Ubaydullayeva D.H. Ko'p davrli cho'zilish deformatsiyasini baholash metodikasini takomillashtirish	57
Arabov J.S., Matismailov S.L., Urmanov N.T., Islomova M.S., Ergashova J.J. Qutblangan elektr maydonida sintetik tolalarni emulsiyalashning fizik asoslarini tadqiq etish	59
Karimov K.A., Shaxobutdinov R.E., Karimova A.R., Xo'jamov A. Zoldir prokatlash valogi rebordalariga 35V9X3CF markali kukunli sim qoplama qoplash orqali ish unumdorligini oshirish istiqbollari	63
Абдурахимова М.И., Тухташева М.Н., Сапаров Б.Ж., Рахимов М.Ю. Оптимизация технологических параметров и исследование механических свойств композиционного покрытия ADC12/SiC для поверхностей корпуса редуктора	66