

ISSN 2221-7789



**ИЗВЕСТИЯ
КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

**PROCEEDING
OF THE KABARDINO-BALKARIAN
STATE UNIVERSITY**

Том XVI № 2

**НАЛЬЧИК
2026**

**ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**PROCEEDINGS OF THE
KABARDINO-BALKARIAN
STATE UNIVERSITY**

TOM XVI, № 2, 2026

Учредитель: Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова (КБГУ)

Главный редактор **С.Ю. ХАШИРОВА**
Первый зам. главного редактора **А.П. САВИНЦЕВ**
Зам. главного редактора **А.М. КАРМОКОВ**
Зам. главного редактора **Г.Б. ШУСТОВ**
Ответственный секретарь **И.В. ДОЛБИН**

Редакционная коллегия

Ашхотов О.Г., Берлин А.А., Борукаев Т.А., Дедков Г.В., Дышеков А.А., Киреев В.В.,
Кушхов Х.Б., Ломоносов И.В., Ляхов Н.З., Мазуров В.Д., Махнев А.А.,
Музафаров А.М., Сухинов А.И., Хоконов М.Х., Хохлов А.Р.

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Реестровая запись от 15.08.2019 г. ПИ № ФС 77-76623.

Подписной индекс в Каталоге «Пресса России» ф 43720.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций.

Доступ к рефератам статей журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки «eLIBRARY.RU» (<http://elibrary.ru>).

ISSN 2221-7789

Адрес редакции: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

Телефоны: (88662) 722313

E-mail: rio@kbsu.ru, <http://izvestia.kbsu.ru>

© Авторы, 2026

© Кабардино-Балкарский государственный
университет им. Х.М. Бербекова, 2026

Founder: Kabardino-Balkarian State University (KBSU)

Editor in chief **S.Yu. KHASHIROVA**
The 1st Deputy Editor **A.P. SAVINTSEV**
Deputy Editor **A.M. KARMOKOV**
Deputy Editor **G.B. SHUSTOV**
Executive secretary **I.V. DOLBIN**

Editorial board

Ashkhotov O.G., Berlin A.A., Borukaev T.A., Dedkov V.G., Dyshekov A.A., Kireev V.V.,
Kushkhov Kh.B., Lomonosov I.V., Lyakhov N.Z., Mazurov V.D., Makhnev A.A.,
Muzafarov A.M., Sukhinov A.I., Khokonov M.Kh., Khokhlov A.R.

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.
Registre entry dated 15.08.2019. PI No. FS 77-76623

Subscription index in the catalog «Russian Press» F 43720

Access to abstracts of articles of the magazine is carried out on the Scientific Electronic Library Online «eLIBRARY.RU» (<http://elibrary.ru>).

ISSN 2221-7789

Editorial address: Kabardino-Balkarian State University, Chernyshevsky st., 173, Nalchik, 360004

Phone number: (88662)722313

E-mail: rio@kbsu.ru, <http://izvestia.kbsu.ru>

© Authors, 2026

© Kabardino-Balkarian State University, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Ахматов З.А., Кунижев Б.И., Гайтукиева З.Х., Жабоев Ж.Ж. Температурная зависимость параметра Грюнайзена и оценка энтропии полиэтилена при сильном динамическом сжатии ...	5
Долбин И.И., Долбин И.В. Зависимость порога перколяции углеродных нанотрубок от степени их дисперсности в полимерной матрице нанокомпозитов	11
Карданова З.И., Азизов И.К., Пшуков А.М., Савинцев А.П., Дышекова А.Х. Анализ механизма пластической деформации плоских микрокристаллов AgBr.....	16
Кяров А.Х., Канаметова О.Х., Савинцев А.П., Дышеков А.А., Бариева А.В., Калова С.С. Атомы Ag и Kr в вариационной модели функционала плотности	21
Кяров А.Х., Коротков П.К., Жугов А.А., Тохов А.А., Шомахов И.М., Дышеков А.А. Структура углеродных наноструктур в аддитивном приближении	26
Магомедов Г.М., Кудров Ю.В., Долбин И.В., Долбин И.И. Физический смысл извилистости траектории молекул газа-пенетранта и ее влияние на газопроницаемость нанокомпозитов.....	32
Масаев М.Б., Гангапшев А.М., Заммиев А.У., Бжихатлов К.Ч., Болиев Д.Э., Аккизов Я.А. Определение вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей сцинтилляционным методом с использованием стратосферного спутника CubeSat 3U.....	37
Шаталов Н.А., Толмачева Е.И., Шаталов А.Ф. Интенсификация теплообмена посредством электроконвекции.....	43

ХИМИЯ

Бажева Э.А., Бесланеева З.Л., Бажева Р.Ч., Федоренко В.А. Способы получения полиарилатов	49
Балаева С.М., Шустов Г.Б., Темираев К.Б., Беева Дж.А., Шетов Р.А. Химическая стойкость хлорсодержащих эпоксидных полимеров	57
Бляшев А.В., Бегиева М.Б. N,N-диаллилакриламид и полимеры на его основе	63
Кокоева А.А., Виндижева А.С. Природные полисахариды как полимерные системы доставки лекарственных средств для лечения заболеваний ороназофарингеальной области: современное состояние и перспективы.....	73
Кяров А.А., Мукожева Р.А., Виндижева М.К., Черкесов З.А., Шогенова М.М. Гетерогенное равновесие и ряд физико-химических свойств насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 30 °C	80
Подзорова М.В., Суханов И.А. Исследование закономерностей деструкции композиционных материалов на основе полиэфиров	87
Темираев К.Б., Худоян М.В., Мишенина И.В., Шустов Г.Б., Балаева С.М., Хакяшева Э.В. Поликарбонаты триптицендиола-2,5	95
Хасанов В.В., Борукаев Т.А. Неорганические молибдаты как функциональные дымоподавляющие присадки для ПВХ-пластиков и кабелей с пониженной горючестью	100
Требования к оформлению научной статьи, представляемой в журнал «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета»	106

CONTENTS

PHYSICS

Akhmatov Z.A., Kunizhev B.I., Gaitukieva Z.K., Zhaboev Zh.Z. Temperature dependence of the Gruneisen parameter and estimation of the entropy of polyethylene under strong dynamic compression.....	5
Dolbin I.I., Dolbin I.V. Dependence of the percolation threshold of carbon nanotubes on the degree of their dispersion in the polymer matrix of nanocomposites	11
Kardanova Z.I., Azizov I.K., Pshukov A.M., Savintsev A.P., Dyshekova A.Kh. Analysis of the plastic deformation mechanism of flat AgBr microcrystals.....	16
Kyarov A.Kh., Kanametova O.Kh., Savintsev A.P., Dyshekov A.A., Barieva A.V., Kalova S.S. Ar and Kr atoms in the density functional variational model	21
Kyarov A.Kh., Korotkov P.K., Zhugov A.A., Tokhov A.A., Shomakhov I.M., Dyshekov A.A. Structure of carbon nanostructures in the additive approximation	26
Magomedov G.M., Kudrov Y.V., Dolbin I.V., Dolbin I.I. The physical meaning of the tortuosity of the trajectory of penetrant gas molecules and its influence on the gas permeability of nanocomposites.....	32
Masaev M.B., Gangapshiev A.M., Zammoev A.U., Bzhikhatlov K.Ch., Boliev D.E., Akkizov Ya.A. Determination of high-altitude distribution variations of the muon component of secondary cosmic rays by the scintillation method using a CubeSat 3U stratospheric satellite	37
Shatalov N.A., Tolmacheva E.I., Shatalov A.F. Intensification of heat exchange through electrical convection.....	43

CHEMISTRY

Bazheva E.A., Beslaneeva Z.L., Bazheva R.Ch., Fedorenko V.A. Methods for producing polyarylates	49
Balaeva S.M., Shustov G.B., Temiraev K.B., Beeva D.A., Shetov R.A. Chemical stability of chlorine-containing epoxy polymers	57
Blyashev A.V., Begieva M.B. N,N-diallylacrilamid and polymers based on it	63
Kokoeva A.A., Vindizheva A.S. Natural polysaccharides as polymer drug delivery systems for the treatment of diseases of the oronasopharyngeal region: current state and prospects.....	73
Kyarov A.A., Mukozheva R.A., Vindizheva M.K., Cherkesov Z.A., Shogenova M.M. Phase equilibrium and specific properties of suspended solves in the $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at 30 °C	80
Podzorova M.V., Sukhanov I.A. Research on the Destruction Patterns of Composite Materials Based on Polyesters.....	87
Temiraev K.B., Khudoyan M.V., Mishenina I.V., Shustov G.B., Balaeva S.M., Khakya-sheva E.V. Triptycenediol-2,5 polycarbonates	95
Khasanov V.V., T.A. Borukaev Inorganic molybdates as functional flame-retardant additives for PVC-plastics and low-flammability cables	100
The demand to the design of the scientific article, represented in the journal «Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University»	106

ФИЗИКА

Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 5–10.
Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(2):5–10.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 539

Температурная зависимость параметра Грюнайзена и оценка энтропии полиэтилена при сильном динамическом сжатии

Зариф Ануарович Ахматов¹, Борис Иналович Кунижев², Зарета Хизировна Гайтукиева³,
Жамал Жабраилович Жабоев⁴

^{1,2,4}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

³Ингушский государственный университет, Республика Ингушетия, Магас, Россия

¹ahmatov1993@yandex.ru

²b.kunizhev51@mail.ru

³zareta.amatxanova@mail.ru

⁴akylman_07@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе проведена оценка изменения энтропии полиэтилена при сильном динамическом сжатии. Показано, что скачок энтропии полиэтилена на фронте волны при ударно-волновом сжатии пропорционален относительному изменению плотности в степени не ниже трех. Используя метод молекулярной динамики и программный пакет LAMMPS получена температурная зависимость параметра Грюнайзена для полиэтилена. График зависимости показывает рост этого параметра от 3,8 до 4,32 в интервале температур 0–90 °С.

Ключевые слова: энтропия, полиэтилен высокой плотности, динамическое сжатие, МД-моделирование, параметр Грюнайзена, ударная волна

Для цитирования: Ахматов З.А., Кунижев Б.И., Гайтукиева З.Х., Жабоев Ж.Ж. Температурная зависимость параметра Грюнайзена и оценка энтропии полиэтилена при сильном динамическом сжатии // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 5–10.

PHYSICS

Original article

Temperature dependence of the Gruneisen parameter and estimation of the entropy of polyethylene under strong dynamic compression

Zarif A. Akhmatov¹, Boris I. Kunizhev², Zareta K. Gaitukieva³, Zhamal Z. Zhaboev⁴

^{1,2,4}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

³Ingush State University, Republic of Ingushetia, Magas, Russia

¹ahmatov1993@yandex.ru

²b.kunizhev51@mail.ru

³zareta.amatxanova@mail.ru

⁴akylman_07@mail.ru

Abstract. This study evaluates the entropy change of polyethylene under strong dynamic compression. It is shown that the entropy jump at the shock front during shock-wave compression is proportional to the relative density change raised to a power of at least three. Using the molecular dynamics method and the LAMMPS software package, the temperature dependence of the Gruneisen parameter for polyethylene was obtained. The resulting dependence indicates that the value of this parameter increases from 3.8 to 4.32 over the temperature range of 0–90 °C.

Keywords: Entropy, high-density polyethylene, dynamic compression, molecular dynamics simulation, Gruneisen parameter, shock wave

For citation: Akhmatov Z.A., Kunizhev B.I., Gaitukieva Z.K., Zhaboev Z.Z. Temperature dependence of the Gruneisen parameter and estimation of the entropy of polyethylene under strong dynamic compression. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):5–10. (In Russ.).

Разработка конструкций и установок из полимерных материалов, подверженных сильным тепловым и динамическим нагрузкам, требует оценки термодинамических параметров материалов в различных состояниях. Для решения подобных задач применяются полуэмпирические модели уравнений состояния, где форма функциональных связей в форме ударных адиабат (например, зависимость давления от плотности или скорости ударной волны от массовой скорости) определяется на основе теоретических представлений о поведении материалов в экстремальных условиях [1]. Важно подчеркнуть, что на сегодняшний день хорошо разработано моделирование поведения металлов, в том числе тонких металлических фольг, высокоэнтропийных сплавов, ионных кристаллов и др. при высоких давлениях и температурах [2]. Менее исследованными остаются полимеры и полимерные композиты, представляющие собой материалы с уникальными физическими свойствами [3].

Фундаментальные характеристики органических соединений, определяющие их поведение в разных фазах, представлены термодинамическими функциями. Одной из таких важнейших функций является энтропия системы. Кроме того, энтропия и энергия Гиббса используются для определения термодинамических свойств поверхностей [4]. Поэтому расчет этих функций является актуальным и представляет научный и практический интерес.

В данной работе исследован полиэтилен высокой плотности (ПВП), полученный под высоким давлением с плотностью $\rho_0 = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, который широко используется в различных конструкциях, подверженных воздействию мощных тепловых и силовых нагрузок. Также ПВП является одним из наиболее важных коммерческих полимерных продуктов на мировом рынке полимеров благодаря своим большим годовым производственным мощностям и отличному соотношению цены и качества, и широко используется для производства пластмассовых изделий [5], термоэлектрических материалов [6], конструкционных пластмасс [7] и т. д. Значительный интерес ПВП привлек в аэрокосмической и оборонной отрасли. В связи с этим изучение термодинамических свойств полиэтилена при различных температурах и давлениях представляется актуальной и востребованной задачей.

В работах [3, 8] изотермы «холодного сжатия» и ударные адиабаты полиэтилена в экстремальных условиях, рассчитаны по моделям А. Молодца и К. Хищенко (рисунк 1).

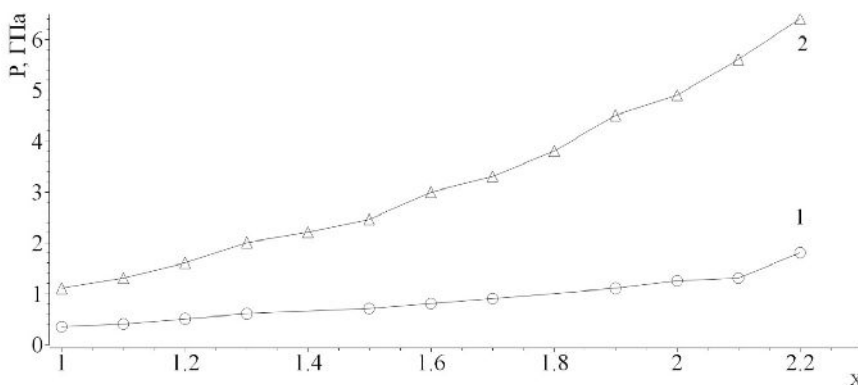


Рисунок 1 – Изотерма холодного сжатия (кривая 1) и ударная адиабата полиэтилена (кривая 2)

При сравнительно небольших давлениях $P \leq 2.0$ ГПа оценим разности величин P_x и P в полиэтилене. Для этого как и в работе [9] введем параметр α , определяемый уравнением

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ_0 – начальная плотность ПЭ, ρ – плотность возмущенной среды.

Известно, что при аппроксимации экспериментальных данных по сжимаемости полимеров пользуются аналитической зависимостью:

$$\Delta P = P - P_0 = \frac{1}{A} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad (2)$$

где $A = 5.5$; $n = 5$, при $0.1 \leq \Delta P \leq 3.5$ ГПа.

Далее, в уравнении состояния твердых тел Ми-Грюнайзена P_x выразим в виде (3):

$$P_x = P_x^{(1)}(V) + \frac{P_0(\gamma + 2)}{2(\gamma + 1)} + \frac{\gamma}{V^{\gamma+1}} \left[\frac{P_0}{2(\gamma + 1)} - \varepsilon_{T_0} \right], \quad (3)$$

где γ – микроскопический параметр Грюнайзена, вычисленный по уравнению Ландау – Слетера [9], ε_{T_0} – начальная тепловая энергия, $P_x^{(1)}$ – полином, зависящий от A, n, γ .

Считая величину α малой по сравнению с единицей и разлагая выражения (2) и (3) в ряд по α , получим:

$$\Delta P - P_x^{(1)} = \frac{1}{A} \left\{ \frac{n\gamma(n+1)[(n-1)(n-2\gamma) + \gamma(\gamma-1)]\alpha^3}{12(n-\gamma)(n-\gamma-1)} + \frac{\gamma n(n+1)[(n-1)(n-2)(2n-3\gamma) + \gamma(\gamma-1)(\gamma-2)]\alpha^4}{2 \cdot 4! (n-\gamma)(n-\gamma-1)} + \dots \right\}.$$

Исходя из условия (1) в расчетах учтем, что удельный объем V меняется мало. Тогда из (4) следует, что разность между ударным сжатием и изотермой холодного сжатия при давлениях порядка 2,0 ГПа пропорциональна величине α^3 .

Дифференциал энтропии dS запишем в виде:

$$dS = \frac{\gamma dV}{V} + \frac{d\varepsilon_T}{\varepsilon_{T_0}}, \quad (5)$$

где $\varepsilon_T = \frac{C_V T}{\varepsilon_0^2}$, C_V – теплоемкость полиэтилена при постоянном объеме.

Интегрируя равенство (5) от точки начального состояния ($S = S_0$, $V = 1$, $\varepsilon_T = \varepsilon_{T_0}$) по произвольного текущего состояния, получим:

$$S - S_0 = \ln \frac{\varepsilon_T V^\gamma}{\varepsilon_{T_0}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) является обобщенным выражением термодинамической функции – энтропии S полимеров. Если имеет место изотермический процесс, то из (6) и уравнения Ми-Грюнайзена получим выражение для адиабаты Пуассона:

$$[P - P_x(V)] = \frac{\text{const}}{V^{\gamma+1}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что произведение теплового давления на текущий удельный объем в степени $(\gamma + 1)$ есть величина постоянная.

Далее, чтобы оценить величину изменения энтропии полиэтилена на фронте ударной волны, исключим из уравнения (6) тепловую энергию ε_T , которую найдем из уравнения состояния Ми-

Грюнайзена

$$\varepsilon_T = \frac{(P - P_X) \cdot V}{\gamma} \quad (8)$$

Подставляя (8) в (6) получим:

$$S - S_0 = \ln \left\{ \frac{1 + (P - P_X) \cdot V^{\gamma+1} - \gamma \cdot \varepsilon_{T_0}}{\gamma \cdot \varepsilon_{T_0}} \right\} \quad (9)$$

При небольших интенсивностях ударной волны дробь в выражении (9) мала. Поэтому представим логарифм в виде ряда

$$S - S_0 = \frac{[P - P_X(V)]V^{\gamma+1} - \gamma \varepsilon_{T_0}}{\gamma \varepsilon_{T_0}} + \dots \quad (10)$$

Воспользовавшись уравнением (3) и разложив $V^{\gamma+1}$ в ряд по α , получим

$$S - S_0 = \frac{1}{\gamma \cdot A \cdot \varepsilon_{T_0}} \{B_1 \alpha^3 + [B_2 - B_1(\gamma + 1)]\alpha^4 + \dots\}, \quad (11)$$

где B_1 – коэффициент из (3) при α^3 ; B_2 – коэффициент из (3) при α^4 .

Из анализа этого выражения следует, что скачок энтропии полиэтилена на фронте волны при ударно – волновом сжатии пропорционален относительному изменению плотности в степени не ниже трех.

В работе также исследована зависимость параметра Грюнайзена для полиэтилена в зависимости от температуры. Для этого использован пакет для классической молекулярной динамики LAMMPS [10]. На рисунке 2 представлен фрагмент полиэтиленовой пластины, использованный при моделировании.

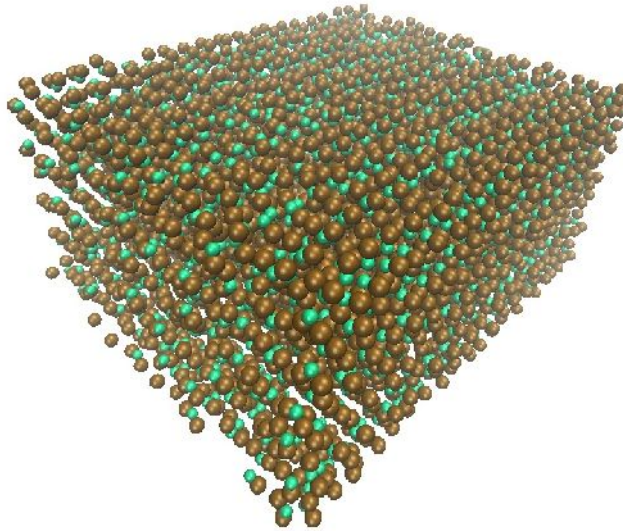


Рисунок 2 – Полиэтиленовая пластина, использованная при МД-моделировании, состоящая из 7200 атомов. Темным цветом выделены атомы углерода, светлым – водорода

МД-моделирование проводилось в выбранном температурном диапазоне 273–363 К. Для описания взаимодействия между атомами углерода и водорода использовался многочастичный потенциал REBO [11], который хорошо подходит для описания материалов с ковалентными связями. Температура системы регулировалась с помощью термостата Нозе–Хувера [12], временной шаг составлял $\tau = 0,1$ фс. Все МД расчеты проводились при давлении 1 атм.

После сбора и обработки данных МД-моделирования был рассчитан параметр Грюнайзена при различных температурах. Результаты представлены на рисунке 3.

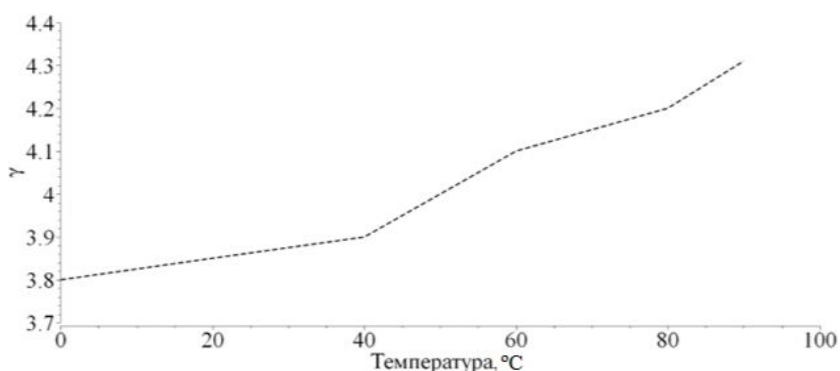


Рисунок 3 – Температурная зависимость параметра Грюнайзена полиэтилена

Как можно заметить из графика, параметр γ увеличивается с ростом температуры. Так, в интервале температур 0–90 °C параметр γ увеличивается от 3,8 до 4,32.

Используя теоретическую модель твердого тела в виде Ми-Грюнайзена, единой ударной адиабаты в виде (2) и диаграмм состояния полиэтилена в экстремальных условиях по моделям А. Молодца и К. Хищенко оценена величина изменения энтропии. Полученные результаты могут быть применены для приближенного описания термодинамических свойств полимеров при небольших давлениях порядка 1–5 ГПа. Методом МД получен параметр Грюнайзена для полиэтилена в зависимости от температуры. Показано, что значение параметра γ увеличивается с повышением температуры системы.

Библиография

1. Бушман А.В., Фортон В.Е. Модели уравнений состояния веществ // Успехи физических наук. 1983. Т. 140, № 2. С. 177–232.
2. Wan C.K., Yuan J.C., Li L., Cai Y. et. al. Dynamic compression of dendritic high-entropy alloy Al 0.5 CoCrFeNi with various microstructures: Experiments and constitutive modeling // Materials Science & Engineering A. 2025. V. 930. P. 1–11.
3. Ахриев А.С., Гайтукиева З.Х., Кунижев Б.И. Исследование функции Грюнайзена и полиэтилена при ударно-волновом нагружении // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2005. № 8. С. 3-13.
4. Theory and simulation of shock waves: Entropy production and energy conversion // Phys. Rev. E. 2021. V. 104. P. 1–18.
5. Hossain M.F. Natural mechanism to console global water, energy, and climate change crisis // Sustainable Energy Technol Assess. 2019. V. 35. P. 347–353.
6. Soleimani Z., Zoras S., Ceranic B., Shahzad S., Cui Y. A review on recent developments of thermoelectric materials for room-temperature applications // Sustainable Energy Technol Assess. 2020. V. 37. P. 100604.
7. Walker S.B., Lanen D., Mukherjee U., Fowler M. Greenhouse gas emissions reductions from applications of Power-to-Gas in power generation // Sustainable Energy Technol Assess. 2017. V. 20. P. 25–32.
8. Щечоева А.Х., Куготова А.М., Кунижев Б.И., Ахриев А.С. Функция Грюнайзена некоторых полимеров и их композитов // Глобальный научный потенциал. 2013. Т. 23, № 2. С. 27–31.
9. Гоголев В.М., Мыркин В.Г. Приближенное уравнение состояния твердых тел // ПМТФ. 1963. № 5. С. 93–98.
10. Thompson A.P., Aktulga H.M., Berger R., Bolintineanu D.S., Brown W.M., et. al. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales // Comput. Phys. Commun, 2022. V. 271. P. 108171.
11. Brenner D.W., Shenderova O.A., Harrison J.A., Stuart S.J., Ni B., Sinnott S.B. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons // J. Phys.: Condens. Matter. 2002. V.14. P. 783–802.
12. Hoover W.G. Canonical Dynamics: Equilibrium Phase-Space Distributions // Phys. Rev. A. 1985. V. 31. P. 1695.

References

1. Bushman A.V., Fortov V.E. Models of the equations of state of substances. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics-Uspekhi*. 1983;140(2):177–232. (In Russ.).
2. Wan C.K., Yuan J.C., Li L., Cai Y. et. al. Dynamic compression of dendritic high-entropy alloy Al 0.5 CoCrFeNi with various microstructures: Experiments and constitutive modeling. *Materials Science & Engineering A*. 2025;930:1–11.
3. Akhriev A.S., Gaitukieva Z.Kh., Kunizhev B.I. Study of the Gruneisen function and polyethylene under shock-wave loading. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Severo-Kavkazskii Region = News of higher educational institutions. North Caucasus region*. 2005;8:3–13. (In Russ.).
4. Theory and simulation of shock waves: Entropy production and energy conversion. *Phys. Rev. E*. 2021;104:1–18.
5. Hossain M.F. Natural mechanism to console global water, energy, and climate change crisis. *Sustainable Energy Technol Assess*. 2019;35:347–353.
6. Soleimani Z., Zoras S., Ceranic B., Shahzad S., Cui Y. A review on recent developments of thermoelectric materials for room-temperature applications. *Sustainable Energy Technol Assess*. 2020;37:100604.
7. Walker S.B., Lanen D., Mukherjee U., Fowler M. Greenhouse gas emissions reductions from applications of Power-to-Gas in power generation. *Sustainable Energy Technol Assess*. 2017;20:25–32.
8. Tsetchoeva A.Kh., Kugotova A.M., Kunizhev B.I., Akhriev A.S. Gruneisen function of some polymers and their composites. *Globalnyi nauchnyi potencial = Global scientific potential*. 2013;23(2):27–31. (In Russ.).
9. Gogolev B.M., Myrkin V.G. Approximate equation of state of solids. *Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1963;5:93–98. (In Russ.).
10. Thompson A.P., Aktulga H.M., Berger R., Bolintineanu D.S., Brown W.M., et. al. LAMMPS – a flexible simulation tool for particle-based materials modeling at the atomic, meso, and continuum scales. *Comput. Phys. Commun*. 2022;271:108171.
11. Brenner D.W., Shenderova O.A., Harrison J.A., Stuart S.J., Ni B., Sinnott S.B. A second-generation reactive empirical bond order (REBO) potential energy expression for hydrocarbons. *J. Phys.: Condens. Matter*. 2002;14:783–802.
12. Hoover W.G. Canonical Dynamics: Equilibrium Phase-Space Distributions. *Phys. Rev. A*. 1985;31:1695.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 541.64: 546.26

Зависимость порога перколяции углеродных нанотрубок от степени их дисперсности в полимерной матрице нанокompозитов

Илья Игоревич Долбин¹, Игорь Викторович Долбин²

¹Российский государственный университет туризма и сервиса, Московская область, дп. Черкизово, Россия

²Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹ilua.06@list.ru

²i_dolbin@mail.ru

Аннотация. Показано, что порог перколяции, уровень анизотропии и степень дисперсности углеродных нанотрубок не являются для последних независимыми характеристиками. Таковыми показателями являются структура агрегатов и содержание нанонаполнителя. Значение фрактальной размерности структуры позволяет прогнозировать свойства полимерных нанокompозитов.

Ключевые слова: нанокompозит, полиэтилен, углеродные нанотрубки, дисперсность, порог перколяции

Для цитирования: Долбин И.И., Долбин И.В. Зависимость порога перколяции углеродных нанотрубок от степени их дисперсности в полимерной матрице нанокompозитов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 11–15.

PHYSICS

Original article

Dependence of the percolation threshold of carbon nanotubes on the degree of their dispersion in the polymer matrix of nanocomposites

Ilya I. Dolbin¹, Igor V. Dolbin²

¹Russian State University of Tourism and Service, Moscow Region, dp. Cherkizovo, Russia

²Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹ilua.06@list.ru

²i_dolbin@mail.ru

Abstract. It has been shown that the percolation threshold, anisotropy level, and degree of dispersion of carbon nanotubes are not independent characteristics. Such indicators are the structure of aggregates and the content of nanofiller. The value of the fractal dimension of the structure allows us to predict the properties of polymer nanocomposites.

Key words: nanocomposite, polyethylene, carbon nanotubes, dispersion, percolation threshold

For citation: Dolbin I.I., Dolbin I.V. Dependence of the percolation threshold of carbon nanotubes on the degree of their dispersion in the polymer matrix of nanocomposites. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):11–15. (In Russ.).

Введение

Как хорошо известно, дисперсность нанонаполнителя играет определяющую роль в формировании свойств полимерных нанокомпозитов [1]. В частности, этот показатель влияет на структуру нанонаполнителя в полимерной матрице нанокомпозитов, контролируя его порог перколяции, т. е. содержание нанонаполнителя, при котором он формирует непрерывный перколяционный кластер (каркас) [2]. Авторы [2] показали, что величина порога перколяции углеродных нанотрубок (УНТ) ϕ_c зависит как от степени дисперсности, так и от уровня анизотропии этого нанонаполнителя. В указанной модели предполагается два разных уравнения для определения степени дисперсности УНТ в зависимости от типа их структурного состояния (в форме агрегатов УНТ или отдельных нанотрубок), которые включают около 10 параметров, необходимых для расчетов. Кроме того, авторы [2] ошибочно предположили, что степень дисперсности и уровень анизотропии УНТ являются независимыми параметрами. Поэтому целью настоящей работы является разработка простой количественной модели для получения соотношения между порогом перколяции и степенью дисперсности УНТ, а также описания механических свойств нанокомпозитов на основе полимера и УНТ с использованием указанного соотношения.

Экспериментальная часть

В качестве матричного полимера использован полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) со средне-весовой молекулярной массой ~ 14 кг/моль. В качестве нанонаполнителя применялись однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) с наружным диаметром 0,8–2,0 нм производства фирмы Carbon Nanotechnologies Inc. (Китай). Додекилсульфат натрия (ДСН) использовался в качестве поверхностно-активного вещества (ПАВ) [3].

Дисперсия ОУНТ в водном растворе приготовлена с помощью ДСН согласно следующей методике. Водный раствор объемом 20 мл, содержащий 0,22 г ОУНТ и 0,5 масс. % ДСН, обрабатывался ультразвуком в течение 15 мин, а затем в центрифуге при 3000 об/мин в течение 20 мин. После такой обработки примерно 90 % ОУНТ переходило в суспензию на основе водного раствора [3].

Водная суспензия с содержанием ОУНТ 0,20 масс. % распылялась на поверхности углеродных нанотрубок при встряхивании, чтобы гарантировать однородную адсорбцию раствора ОУНТ. Затем порошок ПЭВП с адсорбированными ОУНТ сушился в вакуумной печи при температуре 363 К в течение часа. Образцы для испытаний получены методом экструзии на двухшнековом экструдере DACA Microcompounder при температуре в барабане экструдера 433 К в течение 20 мин при скорости сонаправленного вращения шнеков 50 об/мин. При сохранении постоянного крутящего момента в течение 5 мин процесс смешивания прекращался [3].

Измерения механических свойств выполнены на приборе для растяжения марки DXL-2000 производства Shanghai (Китай). Использованы образцы в форме листов толщиной ~ 1 мм. Результат получен усреднением данных для пяти образцов [3].

Результаты и обсуждение

Для получения соотношения между порогом перколяции ϕ_c и степенью дисперсности η_d УНТ в полимерной матрице нанокомпозита необходимы методики определения этих параметров [4-6]. Величину ϕ_c для анизотропных нанонаполнителей, к которым относятся и УНТ, можно определить согласно следующей формуле [7]:

$$\phi_c = \frac{3\phi_c^{c\phi}}{2\alpha}, \quad (1)$$

где $\phi_c^{c\phi}$ – порог перколяции для взаимопроникающих случайно упакованных сфер, α – уровень анизотропии нанонаполнителя в полимерной матрице нанокомпозита.

Величину α можно определить, используя следующее простое уравнение [8]:

$$\alpha = 17D_f^2, \quad (2)$$

где D_f – фрактальная размерность структуры агрегатов частиц нанонаполнителя, физически строго характеризующая эту структуру.

Полагая величину $\Phi_c^{cf} = \text{const} = 0,34 \pm 0,02$ [9], из формулы (1) можно получить простое уравнение:

$$\Phi_c = \frac{0,03}{D_f^2}. \quad (3)$$

В свою очередь, размерность D_f может быть определена с помощью следующего соотношения [10]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 17 D_f^2 \Phi_n, \quad (4)$$

где E_n и E_m – модули упругости нанокompозита и матричного полимера, соответственно (отношение E_n/E_m принято определять как степень усиления нанокompозита), Φ_n – относительное объемное содержание нанонаполнителя, определяемое следующим образом [11]:

$$\Phi_n = \left[1 + \left(\frac{\rho_n}{\rho_m} \right) \left(\frac{100 - W_n}{W_n} \right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где ρ_n и ρ_m – плотность нанонаполнителя и матричного полимера, соответственно (отношение (ρ_n/ρ_m) принято равным 2,0 [11]), W_n – массовое содержание нанонаполнителя, масс. %.

И наконец, степень дисперсности η_d нанонаполнителя можно рассчитать согласно уравнению [12]:

$$\eta_d = \frac{D_f}{\Phi_n^{1/2}}. \quad (6)$$

Совместное рассмотрение уравнений (1)–(6) демонстрирует, что характеристики нанонаполнителя Φ_c , α и η_d не являются независимыми, а определяются параметрами D_f и Φ_n , которые и служат независимыми характеристиками полимерного нанокompозита.

Сочетание уравнений (3) и (6) позволяет получить следующее простое аналитическое соотношение между порогом перколяции Φ_c УНТ в полимерной матрице нанокompозита и степенью их дисперсности η_d :

$$\Phi_c = \frac{0,03}{\eta_d^2 \Phi_n}, \quad (7)$$

из которого следует очень сильная (квадратичная) зависимость Φ_c от η_d , превышающая по силе зависимость от Φ_n (только в первой степени).

Зависимость степени усиления E_n/E_m от уровня анизотропии нанонаполнителя α дает простое соотношение [13]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + \alpha \Phi_n. \quad (8)$$

Сочетание уравнений (1) и (8) позволяет получить зависимость величины E_n/E_m от двух характеристик нанонаполнителя, а именно: его содержания Φ_n и порога перколяции Φ_c (при условии $\Phi_c^{cf} = 0,34 \pm 0,02$):

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 0,51 \left(\frac{\Phi_n}{\Phi_c} \right). \quad (9)$$

Это уравнение наглядно демонстрирует преимущество изначально сильно анизотропных нанонаполнителей, к которым относятся углеродные нанотрубки и графен, по сравнению с дисперсными микрочастицами. Так, величина Φ_c для углеродной сажи варьируется в пределах 0,015–0,075, а для металлических порошков она достигает 0,30 и выше [2]. В случае УНТ, теоретически полученный интервал Φ_c , согласно уравнению (3), составляет (при $D_f = 1-3$) 0,0033–0,030, что хорошо согласуется с определенным для УНТ экспериментально диапазоном $\Phi_c = 0,002-0,020$ [2].

На рисунке 1 сравниваются теоретическая (согласно уравнению (9)) и экспериментальная зависимости степени усиления E_n/E_m от объемного содержания нанонаполнителя Φ_n для рассматриваемых нанокompозитов ПЭВП/ОУНТ. Как следует из этого сравнения, получено хорошее соответствие теории и эксперимента (их среднее расхождение составляет менее 4 %, что сопоставимо с экспериментальной погрешностью определения степени усиления E_n/E_m), подтверждающее корректность предложенной трактовки.

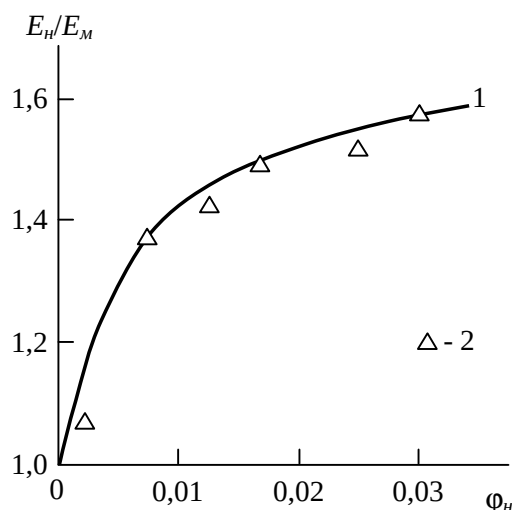


Рисунок 1 – Сравнение рассчитанной теоретически согласно уравнению (9) (1) и полученной экспериментально (2) зависимостей степени усиления E_n/E_m от объемного содержания нанонаполнителя ϕ_n для нанокompозитов ПЭВП/ОУНТ

В заключение следует отметить два аспекта. Во-первых, из уравнения (7) следует, что при $\eta_d=0$ ϕ_c стремится к бесконечности, т. е. для формирования перколяционного кластера наночастиц требуется конечная степень дисперсии нанонаполнителя. Величина $\eta_d=0$ (согласно уравнению (6)) реализуется при $D_f=0$, т. е. для геометрической точки. Во-вторых, величину η_d можно определить альтернативным способом [12]:

$$\eta_d = \frac{\phi_n + \phi_{mf}}{\phi_n}, \quad (10)$$

где ϕ_{mf} – относительное объемное содержание межфазных областей в нанокompозите.

Из уравнения (10) следует существенная роль межфазных областей в определении величины ϕ_c , особенно с учетом того факта, что в случае нанокompозитов часто выполняется условие $\phi_{mf} \gg \phi_n$ [10].

Выводы

Следовательно, изложенные выше результаты продемонстрировали, что порог перколяции, уровень анизотропии и степень дисперсности углеродных нанотрубок не являются для них независимыми характеристиками. Такими показателями служат структура агрегатов и содержание этого нанонаполнителя. Повышение дисперсности нанонаполнителя (в рассматриваемом случае углеродных нанотрубок) приводит к снижению его порога перколяции и соответствующему улучшению механических характеристик нанокompозитов на основе полимер/углеродных нанотрубок. Для достижения порога перколяции, т.е. формирования перколяционного кластера, необходима конечная (отличная от нуля) степень дисперсности нанонаполнителя. Знание указанной степени (или фрактальной размерности структуры) нанонаполнителя позволяет прогнозировать свойства полимерных нанокompозитов.

Библиография

1. Šupova M., Martynkova G.S., Barabaszova K. Effect of nanofiller dispersion in polymer matrices: A review // Sci. Advanced Mater. 2011. V. 3, N 1. P. 1–25.
2. By J.L., Ma P.C., Chow W.S., To C.K., Tang B.Z., Kim J.-K. Correlations between percolation threshold, dispersion state, and aspect ratio of carbon nanotubes // Adv. Funct. Mater. 2007. V. 17, N 11. P. 3207–3215.
3. Zhang Q., Pastogi S., Chen D., Lippits D., Lemstra P.J. Low percolation threshold in single-walled carbon nanotube/high density polyethylene composites prepared by melt processing technique // Carbon. 2006. V. 44, N 4. P. 778–785.
4. Козлов Г.В., Долбин И.В., Карнет Ю.Н., Власов А.Н., Долбин И.И. Моделирование углеродных нанотрубок (нановолокон) как макромолекулярных клубков – модель свободносочлененной цепи // Механика композиционных материалов и конструкций. 2025. Т. 31, № 1. С. 74–81.

5. Долбин И.И., Кумышева Ю.А., Казанчева Л.А., Долбин И.В., Давыдова В.В. Пропорциональность содержания нанонаполнителя и межфазных областей в полимерных нанокompозитах // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2025. Т. 15, № 3. С. 34–39.
6. Долбин И.И., Долбин И.В., Давыдова В.В., Чавдарь У.Д. Моделирование степени усиления дисперсно-наполненных композитов полиэтилен/гидроксипатит в рамках фрактального анализа // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 1. С. 10–14.
7. Kim H., Macosco C.W. Processing-property relationship of polycarbonate/grapheme composites // Polymer. 2009. V. 50, N 13. P. 3797–3809.
8. Козлов Г.В., Долбин И.В. Моделирование степени усиления нанокompозитов эластомер/2D-нанонаполнитель // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65, № 1. С. 38–43.
9. Бобрышев А.Н., Козомазов В.Н., Бабин Л.О., Соломатов В.И. Синергетика композитных материалов. Липецк: НПО ОРИУС, 1994. 154 с.
10. Атлуханова Л.Б., Козлов Г.В. Физикохимия нанокompозитов полимер-углеродные нанотрубки. М.: Спутник +, 2020. 292 с.
11. Jeong W., Kessler M.P. Toughness enhancement in ROMP functionalized carbon nanotube/polydicyclopentadiene composites // Chem. Mater. 2008. V. 20, N 22. P. 7060–7068.
12. Атлуханова Л.Б., Долбин И.В. Взаимосвязь свойств и степени дисперсии нанонаполнителя для нанокompозитов полимер/углеродные нанотрубки // Наноиндустрия. 2024. Т. 17, № 1. С. 74–79.
13. Schaefer D., Justice R.S. How nano are nanocomposites? // Macromolecules. 2007. V. 40, N 24. P. 8501–8517.

References

1. Šupova M., Martynkova G.S., Barabaszova K. Effect of nanofiller dispersion in polymer matrices: A review. *Sci. Advanced Mater.* 2011;3(1):1–25.
2. By J.L., Ma P.C., Chow W.S., To C.K., Tang B.Z., Kim J.-K. Correlations between percolation threshold, dispersion state, and aspect ratio of carbon nanotubes. *Adv. Funct. Mater.* 2007;17(11):3207–3215.
3. Zhang Q., Pastogi S., Chen D., Lippits D., Lemstra P.J. Low percolation threshold in single-walled carbon nanotube/high density polyethylene composites prepared by melt processing technique. *Carbon*. 2006;44(4):778–785.
4. Kozlov G.V., Dolbin I.V., Karnet Yu.N., Vlasov A.N., Dolbin I.I. Modeling of carbon nanotubes (nanofibers) as macromolecular balls – a model of a freely jointed chain. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktivnykh sistem = Mechanics of composite materials and structures*. 2025;31(1):74–81. (In Russ.).
5. Dolbin I.I., Kumysheva Yu.A., Kazancheva L.A., Dolbin I.V., Davydova V.V. Proportionality of the content of nanofiller and interfacial regions in polymer nanocomposites. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2025;15(3):34–39. (In Russ.).
6. Dolbin I.I., Dolbin I.V., Davydova V.V., Chavdar U.D. Modeling the degree of reinforcement of dispersed-filled polyethylene/hydroxyapatite composites within the framework of fractal analysis. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(1):10–14. (In Russ.).
7. Kim H., Macosco C.W. Processing-property relationship of polycarbonate/grapheme composites. *Polymer*. 2009;50(13):3797–3809.
8. Kozlov G.V., Dolbin I.V. Modeling the degree of reinforcement of elastomer/2D nanofiller nanocomposites. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*. 2022;65(1):38–43. (In Russ.).
9. Bobryshev A.N., Kozomazov V.N., Babin L.O., Solomatov V.I. Synergetics of composite materials. Lipetsk: NPO ORIUS; 1994. 154 p. (In Russ.).
10. Atlukhanova L.B., Kozlov G.V. Physicochemistry of polymer-carbon nanotube nanocomposites. Moscow: Sputnik +; 2020. 292 p. (In Russ.).
11. Jeong W., Kessler M.P. Toughness enhancement in ROMP functionalized carbon nanotube/polydicyclopentadiene composites. *Chem. Mater.* 2008;20(22):7060–7068.
12. Atlukhanova L.B., Dolbin I.V. The interconnection of properties and dispersion degree of nanofiller for nanocomposites polymer/carbon nanotube. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2024;17(1):74–79. (In Russ.).
13. Schaefer D., Justice R.S. How nano are nanocomposites? *Macromolecules*. 2007;40(24):8501–8517.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 5480; 535.6

Анализ механизма пластической деформации плоских микрокристаллов AgBr

Замира Ибрагимовна Карданова¹, Исуф Кадырович Азизов², Адам Музарифович Пшуков³,
Алексей Петрович Савинцев⁴, Аминат Хусеновна Дышекова⁵

^{1,2,3,4,5}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹zam.182@inbox.ru

²kocev.isuf@mail.ru

³pshukov1959@mail.ru

⁴savinal@mail.ru

⁵aminatdh@mail.ru

Аннотация. В работе исследованы условия деформации плоских микрокристаллов бромида серебра и их влияние на структурные и оптические свойства материала. Найдено, что деформация микрокристаллов может существенно изменять интенсивность инфракрасного свечения и параметры кристаллической решётки, что критично для функциональных характеристик устройств.

Ключевые слова: бромид серебра, плоские микрокристаллы, деформация, дефекты Френкеля, ИК люминесценция, рентгеноструктурный анализ, оптическая микроскопия, актиничное освещение

Для цитирования: Карданова З.И., Азизов И.К., Пшуков А.М., Савинцев А.П., Дышекова А.Х. Анализ механизма пластической деформации плоских микрокристаллов AgBr // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 16–20.

PHYSICS

Original article

Analysis of the plastic deformation mechanism of flat AgBr microcrystals

Zamira I. Kardanova¹, Isuf K. Azizov², Adam M. Pshukov³, Alexey P. Savintsev⁴, Aminat K. Dyshakova⁵

^{1,2,3,4,5}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹zam.182@inbox.ru

²kocev.isuf@mail.ru

³pshukov1959@mail.ru

⁴savinal@mail.ru

⁵aminatdh@mail.ru

Abstract. The paper studies the deformation conditions of flat microcrystals of silver bromide and their effect on the structural and optical properties of the material. It was found, that the deformation of MCs can significantly alter the intensity of infrared luminescence and the parameters of the crystal lattice, which is critical for the functional characteristics of devices

Keywords: silver bromide, flat microcrystals, deformation, Frankel defects, IR luminescence, X-ray diffraction analysis, optical microscopy, actinic illumination

For citation: Kardanova Z.I., Azizov Is.K., Pshukov A.M., Savintsev A.P., Dyshekova A.Kh. Analysis of the plastic deformation mechanism of flat AgBr microcrystals. *Proceedings Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):16–20. (In Russ.).

Введение

Галогениды серебра, в частности бромид серебра (AgBr), занимают особое место в современной фотохимии и материаловедении благодаря уникальным оптическим и люминесцентным свойствам. Микрокристаллы (МК) AgBr широко применяются в производстве фотоэмульсий, оптоэлектронных устройств, и других высокотехнологичных материалов. Особого внимания заслуживают плоские МК AgBr: их структура и свойства во многом определяют функциональные характеристики конечных изделий.

Актуальность исследования обусловлена тем, что деформация плоских МК AgBr может существенно влиять на их оптические и структурные свойства, в частности, на интенсивность инфракрасного (ИК) свечения и параметры кристаллической решётки. Понимание механизмов, вызывающих деформацию МК, необходимо:

- для контроля качества фотоэмульсий;
- оптимизации условий синтеза микрокристаллов с заданными характеристиками;
- разработки новых материалов с улучшенными люминесцентными свойствами;
- прогнозирования стабильности МК AgBr в различных условиях эксплуатации.

Цель работы – выявить условия, при которых происходит деформация плоских микрокристаллов AgBr, и установить связь между этими условиями и изменениями в структуре и люминесцентных свойствах материала.

Методы исследования включали: рентгеноструктурный анализ (определение параметров решётки и межплоскостных расстояний); оптическую микроскопию (наблюдение за формированием и деформацией МК в реальном времени); спектроскопию ИК-люминесценции (анализ свечения и его зависимости от условий синтеза); модельный синтез МК AgBr с контролируемыми параметрами (концентрация реагентов, температура, время выдержки).

Результаты исследований и их обсуждение

Изучая люминесцентные свойства галогенидов серебра [1] автор обнаружил, что плоские МК AgBr имеют люминесцентное свечение в инфракрасной (ИК) области с $\lambda = 760$ нм. Полученные данные показывают зависимость интенсивности полосы ИК свечения от избытка ионов брома в дисперсионной среде и от отношения поверхности к объёму, где отношение диаметра поверхности к толщине h может составлять 10–1000 единиц.

Доказано, что полоса ИК свечения AgBr фотоэмульсионных МК на $\lambda = 760$ нм, является собственной полосой свечения AgBr. При этом центры, ответственные за свечение люминесценции с $\lambda = 760$ нм содержат атомы серебра.

Следует предположить, что большой избыток Br^- ионов при осаждении AgBr МК, особенно в начальной стадии, будет благоприятствовать образованию МК в дисперсионной среде, поверхность которого заряжается отрицательно, стабилизируя огранку $\{111\}$ [2].

Для компенсации избыточного отрицательного заряда поверхности из объёма вытягиваются подвижные Ag^+ -ионы, которые могут локализоваться на поверхностных энергетических уровнях. Такому процессу ничего практически не мешает: во-первых, на поверхности $\{111\}$ имеются незаполненные тетраэдрические пустоты в вершинах которого сидят Br^- (рисунки 1); во-вторых, как видно из рисунка 2, Ag^+ -ионы могут перемещаться по $\{110\}$ плоскостям, так как ионный радиус Ag^+ ($< 1,13$ Å) примерно в два раза меньше расстояния между ближайшими ионами брома в узле кристаллической решётки AgBr ($\Delta l = 2,123$ Å).

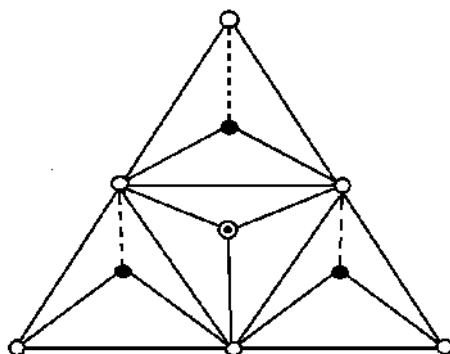


Рисунок 1 – Тетраэдрическая пустота, способная локализовать ион на поверхности {111}

○ – ионы брома первого слоя; ● – ионы серебра второго слоя; ⊙ – ионы брома третьего слоя

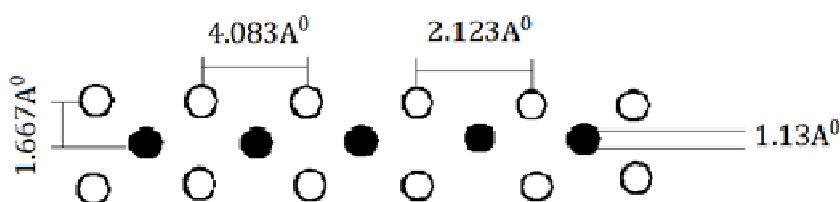
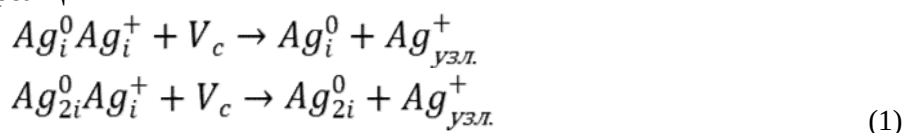


Рисунок 2 – Параметры кристаллической решётки AgBr плоского МК

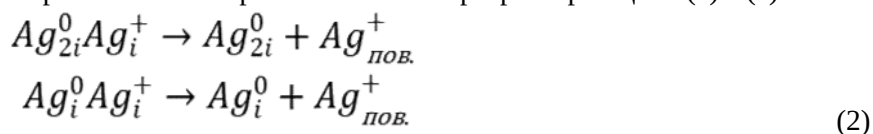
○ – ионы брома; ● – ионы серебра

На самом деле наиболее убедительное объяснение некоторых особенностей динамики решётки AgBr (нарушение соотношения Кочи, смягчения колебательных мод) основано на предположении, что 4-d-оболочки иона серебра подвергается квадрупольной, сигарообразной деформации при взаимодействии Ag^+ -ионов с кристаллическим окружением.

По этим причинам Ag^+ -ионы могут диффундировать на поверхность МК, способствуя тем самым образованию атомов серебра по реакции



Общим результатом нейтрализации отрицательного заряда поверхности межузельными ионами серебра является распад серебряных центров с образованием нейтральных атомов серебра по реакциям (1) и (2)



Из предложенного механизма следует, что любая нейтрализация поверхности AgBr МК приведет к изменению параметров решётки. А также образование Ag^+ -иона и её связывание поверхностью, приводит к возникновению в объёме МК катионной вакансии V_c , то есть образуются дефекты Френкеля. Образование пар Френкеля приводит к изменению параметра решетки [3].

Представляется возможным проверить изложенный механизм дифрактометрическим методом. При этом нужно учесть, что изменение параметра решётки легче проследить на плоских МК AgBr.

В этом методе снималось $\text{CoK}\alpha$ излучение от плоских МК AgBr. Результаты рентгеноструктурного анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Усреднённые значения межплоскостных расстояний

Образец	$\alpha(A^0) = \sum_1^n d_i/n; (\pm 5 \cdot 10^{-4} A^0)$			$\alpha(A^0)$	$\frac{\alpha_{200}}{\alpha_{222}} = \sqrt{3}$
	222	200	111		
Плоский AgBr	1,6675	2,8886	3,3355	5,7768	1,7322
Монодисперсн.	1,6669	2,8872	3,3339	5,7745	1,7321

Как видно из таблицы, имеется хорошее соответствие между параметрами решётки в различных кристаллографических направлениях.

Таким образом, изменение параметра решётки AgBr плоского МК можно отнести за счет образования дефектов Френкеля при нейтрализации поверхности кристалла, при котором межузельные ионы серебра вытягиваются в приповерхностную область кристалла.

Существенные изменения параметра решетки плоских МК происходит и при освещении (засветке) МК AgBr актиничным светом [4, 5]

Проведены многочисленные исследования с целью выяснения, при каких условиях могут так сильно деформироваться плоские МК AgBr. Это явления довольно редкое.

Далее проводилась замена двухструнного метода синтеза МК AgBr на модельный. В этом случае 50 мл 1 %-ного азотнокислого серебра в течение 3 мин вливали в 50 мл одно-нормального раствора KBr при температуре 35 °С. Осадок промывали деконтацией и заливали 300 мл 15 %-ного раствора аммиака. Раствор в закрытом сосуде простаивал 1–2 суток при комнатной температуре.

После этого раствор тонким слоем наносили на предметное стекло. Через несколько минут на поверхность стекла оседали крупные МК. Процесс образования МК AgBr наблюдали с помощью оптического микроскопа «Velomel» Карл Цейс. Меняя режим наблюдения с момента нанесения слоев до полного высыхания раствора, обнаружили очень редко деформируемые МК в начале формирования кристаллов.

Так как спектр поглощения AgBr 460–480 нм, то

$$h = \frac{465}{4 \cdot 2,8} = \frac{465}{11,2} = 41,5 \text{ нм},$$

$$h = \frac{475}{2 \cdot 2,8} = \frac{475}{11,2} = 42,4 \text{ нм}.$$

Из экспериментов было установлено, что диапазон толщин МК AgBr, способных эффективно деформироваться, находятся в интервале от 41,5 нм до 42,4 нм. Выявлена роль дефектов Френкеля в изменении параметров решётки и деформации МК, продемонстрировано влияние актиничного освещения на структурную стабильность МК AgBr. Уточнены механизмы диффузии ионов серебра и брома в кристаллической решётке при различных условиях синтеза. Показано, что избыток ионов Br⁻ на стадии осаждения запускает процессы, приводящие к дефектам Френкеля и последующей деформации.

Полученные данные расширяют представления о динамике кристаллической решётки галогенидов серебра и могут служить основой для разработки новых технологических подходов в области фотохимии и материаловедения.

Заключение

Деформация плоских МК AgBr представляет собой комплексный процесс, обусловленный взаимодействием поверхностных зарядовых эффектов, диффузии ионов серебра, образования дефектов Френкеля и фотохимических процессов. Наиболее подвержены деформации кристаллы толщиной 41,5–42,4 нм на начальной стадии роста при избытке ионов Br⁻ в среде.

Полученные результаты расширяют понимание динамики кристаллической решётки галогенидов серебра и могут быть полезны для управления свойствами МК AgBr в практических приложениях (например, в фотоэмульсиях).

Библиография

1. Джеймс Т.Х. Теория фотографического процесса. Л.: Химия, 1980. 672 с.
2. Чибисов К.В. Общая фотография. М., 1984. 448 с.
3. Лиев А.Х. Образование собственных и примесных центров светочувствительности в эмульсионных микрокристаллах бромида серебра: дис...канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 1985. 161 с.
4. Forsgard F.G. Silber Bromid Complect in the Mechanism of Ageing Fog // *Potogr. Sciense and Eng.* 1959. V. 3, N 1. P. 23–27.
5. Бреслав Ю.А., Пейсахов В.В., Капчук Л.Я., Анреянов В.В. Механизм образования и свойства Т-кристаллов» // Тез. межд. симп. «Актуальные вопросы физики и химии фотографического процесса». Тбилиси, 1984. С. 8–10.

References

1. James T.H. Theory of the Photographic Process. Leningrad: Chemistry; 1980. 672 p. (In Russ.).
2. Chibisov K.V. General Photography. Moscow: 1984. 448 p. (In Russ.).
3. Liev A.Kh. Formation of Intrinsic and Impurity Photosensitive Centers in Emulsion Microcrystals of Silver Bromide: Dissertation of Cand. Sci. and Mathematics. Nalchik: 1985. 161 p. (In Russ.).
4. Forsgard F.G. Silver Bromid Complex in the Mechanism of Aging Fog. *Potogr. Sciense and Eng.* 1959;3(1):23–27.
5. Breslav Yu.A., Peysakhov V.V., Kapchuk L.Ya., Andreyanov V.V. Mechanism of formation and properties of T-crystals. Abstracts of the int. symp. "Current issues of physics and chemistry of the photographic process". Tbilisi: 1984. pp. 8–10. (In Russ.).

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 539.19; 533.9.15

Атомы Ar и Kr в вариационной модели функционала плотности

**Аслан Хасанович Кяров¹, Оксана Хусеновна Канаметова², Алексей Петрович Савинцев³,
Артур Альбекович Дышеков⁴, Алина Валериевна Бариева⁵, Сати Султановна Калова⁶**

^{1,2,3,4,5,6}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹aslan.kyarov.61@mail.ru

²kyasova16@mail.ru

³savinal@mail.ru

⁴dyshekov@yandex.ru

⁵barieva.alina2002@icloud.com

⁶sati.kalova@mail.ru

Аннотация. В работе в рамках теории функционала плотности с использованием многопараметрического вариационного принципа исследованы полные энергии, электронные распределения и квантовые поправки к атомам Ar и Kr.

Ключевые слова: электронная плотность, квантовая поправка к кинетической энергии, вариационный принцип, функционал электронной плотности

Для цитирования: Кяров А.Х., Канаметова О.Х., Савинцев А.П., Дышеков А.А., Бариева А.В., Калова С.С. Атомы Ar и Kr в вариационной модели функционала плотности // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 21–25.

PHYSICS

Original article

Ar and Kr atoms in the density functional variational model

Aslan Kh. Kyarov¹, Oksana Kh. Kanametova², Alexey P. Savintsev³, Artur A. Dyshekov⁴, Alina V. Barieva⁵, Sati S. Kalova⁶

^{1,2,3,4,5,6}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹aslan.kyarov.61@mail.ru

²kyasova16@mail.ru

³savinal@mail.ru

⁴dyshekov@yandex.ru

⁵barieva.alina2002@icloud.com

⁶sati.kalova@mail.ru

Abstract. The total energies, electron distributions, and quantum corrections to Ar and Kr atoms are investigated within the framework of density functional theory using the multiparameter variational principle.

Keywords: electron density, quantum correction to kinetic energy, variational principle, electron density functional

For citation: Kyarov A.Kh., Kanametova O.Kh., Savintsev A.P., Dyshekov A.A., Barieva A.V., Kalova S.S. Ar and Kr atoms in the density functional variational model. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026; 16(2):21–25. (In Russ.).

Введение

В связи с бурным развитием нанотехнологий и ее широким применением в медицине и биологии возникает необходимость углубленного изучения и уточнения физических основ, структуры и свойств конденсированных сред.

Целью работы является использование вариационного принципа Ритца в рамках метода функционала электронной плотности для изучения возможностей применения кинетической энергии в локальном приближении и квантовой поправки в форме Киржница при расчете характеристик конденсированных сред на примере атомов инертных газов.

Данная публикация является продолжением работ, начатых в [1–6].

Результаты и обсуждение

Теория неоднородного электронного газа является в настоящее время одним из наиболее мощных методов для различных расчетов во многих разделах физики. Однако теоретическое изучение вызывает значительные сложности.

Одним из методов, позволяющих обойти возникающие сложности, является метод Ритца, применяемый непосредственно к функционалу энергии, зависящему от электронной плотности, содержащей в себе вариационные параметры.

Общие вопросы теории функционала плотности (ТФП) и, в частности, метода Томаса – Ферми, рассмотрены в монографиях [7, 8].

Формально ТФП была завершена в 1964 году работой Пьера Хохенберга и Кона Уайера [8], которые показывали, что все свойства электронной структуры системы в невырожденном основном состоянии полностью определяются ее электронной плотностью.

Выберем наиболее точную аппроксимацию для функционала энергии.

$$E[\rho(r)] = U + K + E_e + E_c + E_q, \quad (1)$$

где $U = U_{en} + U_{ee}$ – классическая кулоновская энергия, K – кинетическая энергия однородного электронного газа.

Градиентная поправка к кинетической энергии выбиралась в форме Киржница [9]:

$$E_q = \frac{1}{72} \int \frac{|\nabla \rho(\vec{r})|^2}{\rho(\vec{r})} d\vec{r}. \quad (2)$$

Необходимость поправки на градиент электронной плотности связана с присущим квантово-статистическим теориям недостатком, обусловленным локальным использованием соотношений для свободных электронов [10].

Электронная плотность атома выбиралась в виде:

$$D(r) = 4\pi r^2 \rho(r) = Nr \left[\sum_{i=1}^2 {}^a\gamma_i {}^a\lambda_i^2 \exp(-{}^a\lambda_i r) + \sum_{j=1}^3 {}^b\gamma_j {}^b\lambda_j ({}^b\lambda_j r - 2) \exp(-{}^b\lambda_j r) \right], \quad (3)$$

где N – число электронов, λ, γ – вариационные параметры. Условия нормировки приводит к связи:

$${}^a\gamma_1 = 1 - {}^a\gamma_2. \quad (4)$$

В функционале энергии градиентная поправка расходится при стремлении $r \rightarrow 0$ как $\ln r$. Необходимо наложить ограничение на электронную плотность:

$$\left. \frac{dD(r)}{dr} \right|_{r=0} = 0. \quad (5)$$

Использование электронных плотностей в виде (3) позволило получить кулоновскую часть энергии в аналитическом виде, что облегчило последующее вычисление функционала энергии и необходимую точность. Значения параметров электронной плотности приведены в *таблице 1*.

Таблица 1 – Параметры электронной плотности (в единицах a_0^{-1} , a_0 – первый Боровский радиус)

Атом	Ar	Kr
$^a\gamma_1$	1,3475	1,9357
$^a\lambda_1$	2,0636	6,029
$^a\gamma_2$	–0,3475	–0,9357
$^a\lambda_2$	32,485	52,84
$^b\gamma_1$	–4,152	–16,31
$^b\lambda_1$	5,045	14,164
$^b\gamma_2$	–8,04	–27,205
$^b\lambda_2$	19,84	38,306
$^b\gamma_3$	0,0	0,8912
$^b\lambda_3$	0,0	2,206

Результаты расчетов показывают высокую точность данной модели при вычислении энергии ионизации любых атомов, включая легкие, что является нетривиальным результатом, учитывая использование квантово-статистической модели. Для атомов инертных газов результаты наших расчетов энергии ионизации оказываются ближе к экспериментальным данным, чем результаты Хартри – Фока (таблица 2).

Таблица 2 – Полная энергия ионизации атомов инертных газов (в атомных единицах)

Атом	Метод ХФ	Данная работа	Эксперимент
Ar	–526,82	–527,67	–527,6 (0,5)
Kr	–2752,05	–2729,7	-

В работе рассчитаны значения кинетической энергии атомов инертных газов. Приведено сравнение с результатами расчетов методом Хартри – Фока (таблица 3).

Таблица 3 – Полная кинетическая энергия (в единицах Хартри)

Атом	Хартри-Фок	Наша модель
Ar	531,1	527,7
Kr	2760	2730

Электронные плотности, полученные в рамках представленной модели, хорошо согласуются с данными Хартри – Фоковской модели: положения минимумов и максимумов практически совпадают (рисунок 1 и 2). Часть электронной плотности из внешней области атома перетягивается во внутреннюю область, обеспечивая за счет электрон-ядерного взаимодействия минимум функционалу. Вблизи ядра Хартри – Фоковская электронная плотность выше, что связано с наложенным на производную от электронной плотности условием (5).

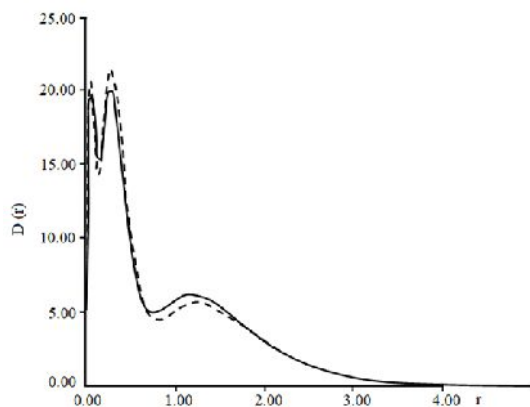


Рисунок 1 – Электронная плотность атома Ag:
— — наши расчеты, - - - - расчеты
в методе Хартри-Фока

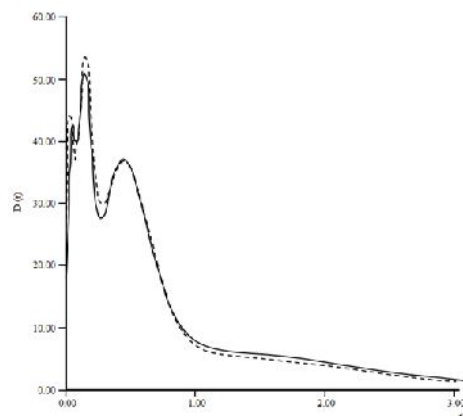


Рисунок 2 – Электронная плотность атома Kr:
— — наши расчеты, - - - - расчеты
в методе Хартри-Фока

Для атома Ag зависимость плотности кинетической энергии от электронной плотности сильно различаются практически во всей области значений электронной плотности, причем в некоторых случаях на порядок. Результаты, полученные с использованием вариационного принципа во всей области значений электронной плотности, выше, чем полученные с использованием Хартри-Фоковских ЭП (рисунок 3).

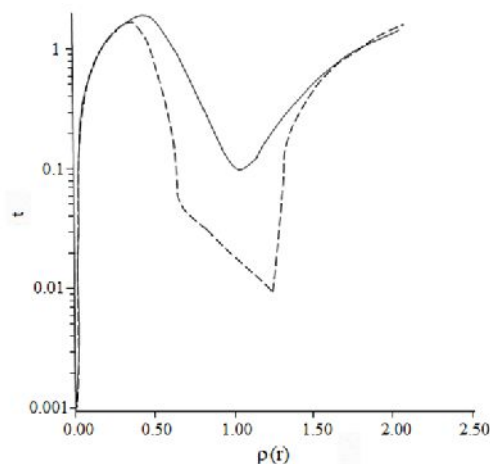


Рисунок 3 – Зависимость плотности кинетической энергии от электронной плотности атома Ag

Расчеты для атома Kr показывают, что плотность кинетической энергии, полученной в нашей работе, практически совпадает с метода Хартри-Фока. Лишь в области значений электронной плотности от 0,3 до 1 плотность кинетической энергии в наших расчетах выше на ~ 20 % (рисунок 4).

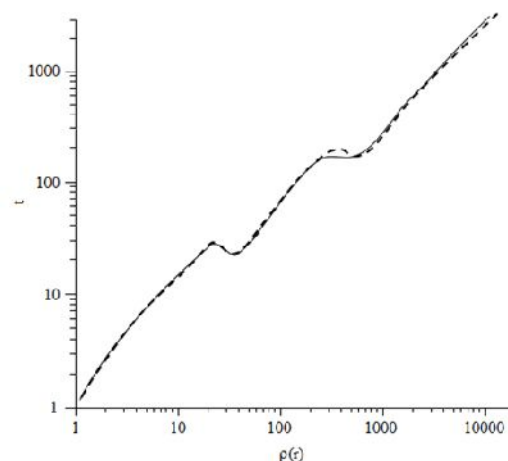
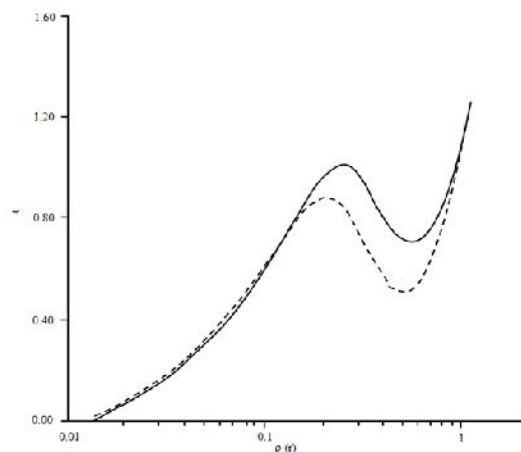


Рисунок 4 – Зависимость плотности кинетической энергии от электронной плотности атома Kr

Выводы

На примере многоэлектронных атомов (Ar и Kr) показано, что использование многопараметрического вариационного принципа для инертных газов в рамках метода функционала плотности улучшает совпадение с экспериментом для полной энергии ионизации, а значит, полученные в работе электронные плотности позволят более точно рассчитывать парные и многочастичные потенциалы взаимодействия для конденсированных сред.

Библиография

1. Кяров А.Х., Савинцев А.П. Статическая поляризуемость атомов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета 2011. Т. 1, № 3. С. 54–59.
2. Кяров А.Х., Савинцев А.П. Поляризуемость в теории функционала плотности // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2014. Т. 4, № 1. С. 98–103.
3. Кяров А.Х., Савинцев А.П. Дисперсионное взаимодействие атомов инертных газов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2014. Т. 4, № 3. С. 35–43.
4. Kyarov A.Kh., Savintsev A.P. Crystal potentials and dispersion forces in additive approximation // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1556. P. 012047.
5. Унежева Ф.Х., Бицуев А.Б., Дышеков А.А., Кяров А.Х., Озрокова Е.М., Савинцев А.П. Вариационная модель дисперсионных взаимодействий // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. Т. 13, № 2. С. 46–53.
6. Кяров А.Х., Савинцев А.П., Дышеков А.А., Унежева Ф.Х., Озрокова Е.М., Пшихачева А.А., Тохтамышева Ф.М. Ван-дер-Ваальсовы силы в модифицированной модели // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2024. Т. 14, № 2. С. 40–44.
7. Теория неоднородного электронного газа / под ред. С. Лундквиста, Н. Марча. М.: Мир, 1987. 400 с.
8. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas // Physical review. 1964. V. 136, N 3B. P. B864–B871.
9. Киржниц Д.А., Лозовик Ю.Е., Шпатаковская Г.В. Статистическая модель вещества // Успехи физических наук. 1975. Т. 117, № 1. С. 3–47.
10. Фортон В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2010. 528 с.

References

1. Kyarov A.Kh., Savintsev A.P. Static polarizability of atoms. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2011;1(3):54–59. (In Russ.).
2. Kyarov A.Kh., Savintsev A.P. Polarizability in density functional theory. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2014; 4(1):98–103. (In Russ.).
3. Kyarov A.Kh., Savintsev A.P. Dispersion interaction of inert gas atoms. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2014; 4(3):35–43. (In Russ.).
4. Kyarov A.Kh., Savintsev A.P. Crystal potentials and dispersion forces in the additive approximation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1556:012047.
5. Unezheva F.Kh., Bitsuev A.B., Dyshekov A.A., Kyarov A.Kh., Ozroкова E.M., Savintsev A.P. Variational model of dispersion interactions. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2023;13(2):46–53. (In Russ.).
6. Kyarov A.Kh., Savintsev A.P., Dyshekov A.A., Unezheva F.Kh., Ozroкова E.M., Pshikhacheva A.A., Tokhtamysheva F.M. Van der Waals forces in a modified model. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2024;14(2):40–44. (In Russ.).
7. Theory of inhomogeneous electron gas / Ed. by S. Lundqvist, N. March. Moscow: Mir; 1987. 400 p. (In Russ.).
8. Hohenberg P., Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Physical review*. 1964;136(3B):B864–B871.
9. Kirzhnits D.A., Lozovik Yu.E., Shpatakovskaya G.V. Statistical model of matter. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics-Uspekhi*. 1975;117(1):3–47. (In Russ.).
10. Fortov V.E., Khrapak A.G., Yakubov I.T. Physics of non-ideal plasma. Moscow: Fizmatlit; 2010. 528 p. (In Russ.).

ФИЗИКА

Научная статья

УДК 539.19; 533.9.15

Структура углеродных наноструктур в аддитивном приближении

Аслан Хасанович Кяров¹, Павел Константинович Коротков², Амир Асланович Жугов³, Астемир Анзорович Тохов⁴, Идар Муратович Шомахов⁵, Азамат Анзорович Дышеков⁶

^{1,2,3,4,5,6}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹aslan.kyarov.61@mail.ru

²pkorotkov1984@mail.ru

³amirzugov@gmail.com

⁴tohov03@mail.ru

⁵taikobeatsuno@gmail.com

⁶dyshekov@azamat-email.ru

Аннотация. Рассмотрена задача моделирования простейших нанообъектов с использованием эмпирических потенциалов. Представлена модель, позволяющая рассчитать устойчивые нанокластеры, равновесные расстояния, число атомов в простейших нанообъектах.

Ключевые слова: потенциал Леннарда-Джонса, наноструктуры, энергия диссоциации, равновесный радиус

Для цитирования: Кяров А.Х., Коротков П.К., Жугов А.А., Тохов А.А., Шомахов И.М., Дышеков А.А. Структура углеродных наноструктур в аддитивном приближении // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 26–31.

PHYSICS

Original article

Structure of carbon nanostructures in the additive approximation

Aslan Kh. Kyarov¹, Pavel K. Korotkov², Amir A. Zhugov³, Astemir A. Tokhov⁴, Idar M. Shomakhov⁵, Azamat A. Dyshekov⁶

^{1,2,3,4,5,6}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹aslan.kyarov.61@mail.ru

²pkorotkov1984@mail.ru

³amirzugov@gmail.com

⁴tohov03@mail.ru

⁵taikobeatsuno@gmail.com

⁶dyshekov@azamat-email.ru

Abstract: The problem of modeling simple nano-objects using empirical potentials is considered. A model is presented for calculating stable nanoclusters, equilibrium distances, and the number of atoms in the simplest components of nano-objects.

Keywords: Lennard-Jones potential, nanostructures, dissociation energy, equilibrium radius

For citation: Kyarov A.Kh., Korotkov P.K., Zhugov A.A., Tokhov A.A., Shomakhov I.M., Dyshekov A.A. Structure of carbon nanostructures in the additive approximation. *Proceedings Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):26–31. (In Russ.).

Введение

Межатомные (межионные) потенциалы могут быть определены как с использованием эмпирических данных, так и путем квантово-механического расчета энергии взаимодействия атомов при различных расстояниях между их ядрами. Неэмпирический расчет позволяет использовать рассчитанные потенциалы для материалов различных структурных типов, моделировать свойства материалов под действием сильных давлений, причем любые расхождения между величинами, полученными в неэмпирическом расчете и измеренными экспериментально, являются следствием хорошо осознаваемых приближений. Кроме того, ценность неэмпирического подхода заключается в обосновании применяемых и в стимулировании новых полуэмпирических моделей.

Существуют, конечно, и другие пути определения параметров парных потенциалов. Однако на сегодняшний день сложности, возникающие при решении подобных задач, не позволяют получить сколь либо удовлетворительные результаты.

Точное знание характера и величины сил межатомных и межмолекулярных взаимодействий крайне важны для правильного предсказания свойств наноструктур. Эти данные необходимы для проектирования и изготовления систем и устройств на основе наноструктур, таких как системы фазового перехода, самосборки, тонкопленочных транзисторов, полупроводниковых наностержней, композитов и т. д. [1–2]. Однако природа и роль межмолекулярных взаимодействий в наноструктурах критикуется в работах ряда авторов, они не до конца понятны.

Результаты и обсуждение

В данной работе в рамках простейших представлений (аддитивность парного взаимодействия атомов, интерполяция потенциалов взаимодействия) исследованы простейшие наноструктуры, их равновесные характеристики и когезионные свойства. Для практических целей бывает достаточно и удобно использовать аппроксимационные потенциалы, заданные в той или иной форме, например, в аналитической.

Рассмотрим простейший нанообъект: N атомов углерода, расположенных на плоском кольце (окружности). Угол между ближайшими атомами:

$$\varphi_{\min} = \frac{2\pi}{N}. \quad (1)$$

Минимальное расстояние между ними:

$$r_{\min} = 2R \sin \frac{\varphi}{2} = 2R \sin \frac{\pi}{N}, \quad (2)$$

где R – радиус окружности.

Расстояния между выбранным (первым) и k – м атомами будут соответственно равны:

$$r_{1,k} = 2R \sin \frac{\pi(k-1)}{N}. \quad (3)$$

Наиболее известным среди аналитических аппроксимаций парного потенциала является потенциал Леннарда-Джонса [3]:

$$U_{\text{парн}}(r) = \varepsilon_0 \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right], \quad (4)$$

где ε_0 – энергия диссоциации молекулы C_2 , r_0 – равновесное расстояние данной молекулы. С учетом (4) для полной энергии взаимодействия первого атома с другими атомами в кольце получим следующее выражение:

$$U(R, N) = \sum_{k=2}^N U_{\text{парн}}(r_{1,k}) = \varepsilon_0 \sum_{k=2}^N \left[\left(\frac{r_0}{r_{1,k}} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r_{1,k}} \right)^6 \right]. \quad (5)$$

Подставляя (3) в (5), получим:

$$U(R, N) = \frac{r_0^6 \epsilon_0}{(2R)^6} \left(\frac{r_0^6}{(2R)^6} \sum_{k=2}^N \frac{1}{\left(\sin \frac{\pi k}{N} \right)^{12}} - 2 \sum_{k=2}^N \frac{1}{\left(\sin \frac{\pi k}{N} \right)^6} \right). \quad (6)$$

Для исследования устойчивой конфигурации данной структуры, определения равновесного расстояния между атомами углерода и энергии взаимодействия, необходимо минимизировать энергию (6).

Из уравнения

$$\frac{\partial U}{\partial R} = 0 \quad (7)$$

получим:

$$\frac{r_0^6}{(2R_0)^6} \sum_{k=2}^N \frac{1}{\left(\sin \frac{\pi k}{N} \right)^{12}} = \sum_{k=2}^N \frac{1}{\left(\sin \frac{\pi k}{N} \right)^6}. \quad (8)$$

Из уравнения

$$\frac{\partial U}{\partial N} = 0 \quad (9)$$

с учетом (8) следует, что:

$$\frac{\partial}{\partial N} \sum_{k=2}^N \frac{1}{\left(\sin \frac{\pi k}{N} \right)^6} = 0. \quad (10)$$

С учетом $\frac{\pi k}{N} = x$ и, переходя в (10) от суммирования к интегрированию, получим:

$$\int \frac{dx}{(\sin x)^6} = -\frac{\cos x}{5(\sin x)^5} - \frac{4}{15} \frac{\cos x}{(\sin x)^3} - \frac{8}{15} \operatorname{ctgx}. \quad (11)$$

Из (10) с учетом (11) получим:

$$-\sin^{-2}(\pi/N) \left(\sin^{-4}(\pi/N) + \frac{1}{3} \sin^{-2}(\pi/N) + \frac{2}{3} \right) + \frac{\cos(\pi/N)}{\sin(\pi/N)} \left(\frac{4\pi}{N^2} \frac{\cos \pi/N}{\sin^5(\pi/N)} + \frac{\pi}{N^2} \frac{\cos(\pi/N)}{\sin^3(\pi/N)} \right) = 0. \quad (12)$$

Считая N достаточно большим, так, чтобы в первом приближении

$$\cos \frac{\pi}{N} \approx 1, \quad \sin \frac{\pi}{N} \approx \frac{\pi}{N}, \quad (13)$$

и, подставляя (13) в (12), получим биквадратное уравнение относительно N :

$$N^4 - N^2 \left(\frac{4}{\pi} - \frac{1}{3} \right) - \pi^3 \left(3 - \frac{2\pi}{3} \right) = 0. \quad (14)$$

Решая полученное уравнение, получим:

$$N = \left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{6} + \sqrt{\left(\frac{2}{\pi} - \frac{1}{6} \right)^2 + \pi^4 \left(\frac{3}{\pi} - \frac{2}{3} \right)} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 5,7892. \quad (15)$$

Таким образом, с учетом принятых в модели приближений, можно утверждать, что наиболее устойчивыми конфигурациями углеродных наноструктур будут гексагональные, но с меньшей долей вероятности будут присутствовать и конфигурации с пятью атомами, что вполне соответствует экспериментальным данным.

Для гексогональной структуры в предложенной модели связь между r_0 и равновесным расстоянием между атомами углерода определяется следующим образом:

$$r_{\min} \approx 2r_0 \sin \frac{\pi}{N} = r_0. \quad (16)$$

При этом энергия взаимодействия атома:

$$E_{\min} \approx -2\varepsilon_0, \quad (17)$$

что близко к экспериментальным данным.

1. Рассмотрим линейную структуру – цепочку атомов углерода. Потенциал парного взаимодействия имеет характерную форму (рисунок 1).

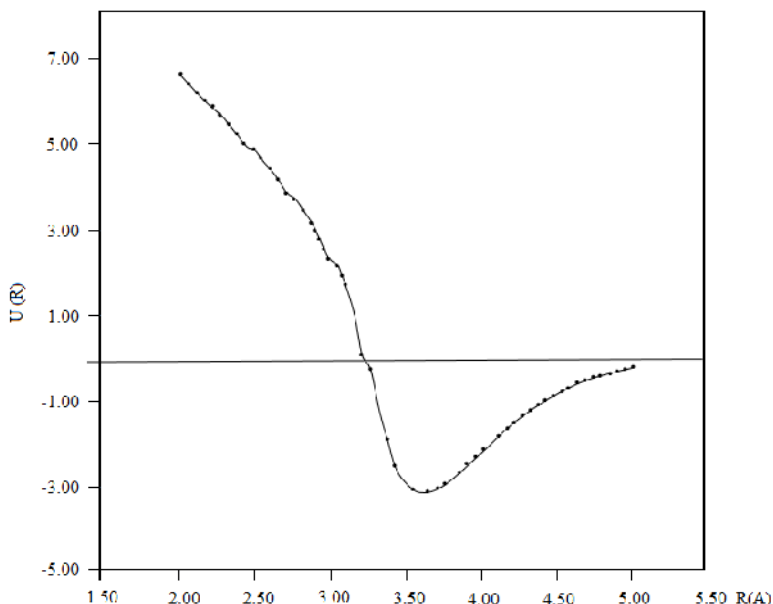


Рисунок 1 – Типичный потенциал парного взаимодействия (в данном случае атомов Ar – Ar)

Минимизируя энергию, получим для нового равновесного расстояния с учетом второй координационной сферы без учета отталкивательной части потенциала взаимодействия:

$$r_{\min} = 0,99444r_0.$$

Учет отталкивательной части потенциала дает следующее значение:

$$r_{\min} = 0,994925r_0,$$

т. е. приводит к незначительному изменению равновесного радиуса меньше 0,02 %.

Линейная цепочка, очевидно, неустойчива (даже в первом приближении) и стремится свернуться в правильную геометрическую фигуру определенной симметрии. Для потенциалов, зависящих только от $|\vec{r}|$ симметричная конфигурация дает наименьшую полную потенциальную энергию системы. Это легко проверяется для трехатомной системы. В приближении потенциала Леннарда-Джонса в полярной системе координат производная по φ от потенциала приводит к условию минимума при $\varphi = 60^\circ$, что означает: три атома складываются в равносторонний треугольник.

Полная энергия атома углерода в бесконечной цепочке:

$$U_{\min} = 2,1355U_0,$$

что более чем в 2 раза больше энергии связи парного взаимодействия C – C, и на 7,5 % больше, чем если бы мы учитывали только приближение ближайшего соседа.

2. Рассмотрим плоскую наноструктуру. Расчеты показали, что с большой точностью достаточно учитывать приближение второй координационной «сферы». В этом случае потенциал взаимодействия атома можно выписать в виде

$$U(r)_{\min} = 6U(r) + 4U(2r) + 4U(\sqrt{5}r) + 4U(\sqrt{4,5}r),$$

Минимизируя потенциал взаимодействия, получим для равновесного расстояния:

$$r_{\min} = 0,9963r_0.$$

При этом

$$U_{\min} = 6,2155U_0,$$

Таким образом, полная энергия связи более чем в 6 раз больше энергии связи парного взаимодействия $C - C$, и на 3,47 % больше, чем если бы мы учитывали только приближение ближайшего соседа.

3. Для расчета цилиндрической наноструктуры с большой точностью достаточно приближения второй координационной сферы. Потенциал взаимодействия атома в этом случае:

$$U(r)_{\min} = 6U(r) + 4U(\sqrt{3}r),$$

$$r_{\min} = 0,9961r_0,$$

$$U_{\min} = 6,44U_0.$$

Таким образом, полная энергия связи чуть менее чем в 6,5 раз больше энергии связи парного взаимодействия $C - C$, и на 7,3 % больше, чем если бы мы учитывали только приближение ближайшего соседа.

4. Если вдоль цилиндра находится линейная цепочка, то в этом случае к выписанному выше потенциалу добавится слагаемое вида:

$$\Delta U(r)_{\min} = 2U(\sqrt{3}r).$$

Это приводит к следующим результатам:

$$r_{\min} = 0,995r_0,$$

$$U_{\min} = 7,4427U_0.$$

Полная энергия связи чуть менее чем в 7,5 раз больше энергии связи парного взаимодействия $C - C$ и на 6,9 % больше, чем если бы мы учитывали только приближение ближайшего соседа.

5. Для сферического нано объекта

$$U(r)_{\min} = 6U(r) + 6U(\sqrt{3}r),$$

Минимизируя потенциал взаимодействия, получим для равновесного расстояния:

$$r_{\min} = 0,9942r_0.$$

При этом

$$U_{\min} = 6,4438U_0.$$

Полная энергия связи чуть менее чем в 6,5 раз больше энергии связи парного взаимодействия $C - C$ и на 7,4 % больше, чем если бы мы учитывали только приближение ближайшего соседа.

6) Для сферического нано объекта с атомом внутри:

$$U(r)_{\min} = 7U(r) + 6U(\sqrt{3}r).$$

Минимизируя потенциал взаимодействия, получим для равновесного расстояния:

$$r_{\min} = 0,9942r_0.$$

При этом

$$U_{\min} = 7,5178U_0.$$

Полная энергия связи чуть более чем в 7,5 раз больше энергии связи парного взаимодействия $C - C$ и на 7,4 % больше, чем если бы мы учитывали только приближение ближайшего соседа

Полученные потенциалы позволяют рассчитать характерные частоты ν для изучаемых нанообъектов:

$$\nu = \frac{3}{\pi r_0} \sqrt{\frac{2|\epsilon_0|}{m}}.$$

Для изучаемых наноструктур $r_{\min} < r_0$, а энергия связи больше, чем у $C - C$ молекулы, и, хотя расчеты пока не приведены, очевидно, что это приводит к возрастанию их собственной частоты.

Выводы

1. Предложена новая модель, позволяющая моделировать структуру простейших нанообъектов.
2. Проведенные расчеты показали хорошее совпадение как по числу атомов в стабильном простейшем нанообъекте, так и по равновесным характеристикам.

Библиография

1. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2000. 224 с.
2. Суздаев И.П. Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М.: Комкнига, 2006. 484 с.

References

1. Gusev A.I., Rempel A.A. Nanocrystalline Materials. Moscow: Fizmatlit; 2000. 224 p.
2. Suzdalev I.P. Physical Chemistry of Nanoclusters, Nanostructures, and Nanomaterials. Moscow: Komkniga; 2006. 484 p.

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 541.64: 532

**Физический смысл извилистости траектории молекул газа-пенетранта
и ее влияние на газопроницаемость нанокompозитов**

**Гусейн Мусаевич Магомедов¹, Юрий Владимирович Кудров², Игорь Викторович Долбин³,
Илья Игоревич Долбин⁴**

¹Дагестанский государственный педагогический университет им. Р. Гамзатова, Республика Дагестан, Махачкала, Россия

^{2,4}Российский государственный университет туризма и сервиса, Московская область, дп. Черкизово, Россия

³Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹mgusein@mail.ru

²yurakudrov@yandex.ru

³i_dolbin@mail.ru

⁴ilua.06@list.ru

Аннотация. Показано существенное влияние структурного фактора на процессы газопереноса для полимерных нанокompозитов. Основным фактором снижения газопроницаемости нанокompозита относительно матричного полимера являются эффекты, возникающие на межфазной границе полимерная матрица – нанонаполнитель.

Ключевые слова: нанокompозит, поликарбонат, графит, газопроницаемость, межфазные взаимодействия

Для цитирования: Магомедов Г.М., Кудров Ю.В., Долбин И.В., Долбин И.И. Физический смысл извилистости траектории молекул газа-пенетранта и ее влияние на газопроницаемость нанокompозитов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 32–36.

PHYSICS

Original article

**The physical meaning of the tortuosity of the trajectory of penetrant gas
molecules and its influence on the gas permeability of nanocomposites**

Gusein M. Magomedov¹, Yurii V. Kudrov², Igor V. Dolbin³, Ilya I. Dolbin⁴

¹Dagestan State Pedagogical University, Republic of Dagestan, Makhachkala, Russia

^{2,4}Russian State University of Tourism and Service, Moscow Region, dp. Cherkizovo, Russia

³Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹mgusein@mail.ru

²yurakudrov@yandex.ru

³i_dolbin@mail.ru

⁴ilua.06@list.ru

Abstract. A significant influence of structural factors on gas transfer processes for polymer nanocomposites is demonstrated. The main factor reducing the gas permeability of the nanocomposite relative to the matrix polymer is the effects at the polymer matrix – nanofiller interface.

Key words: nanocomposite, polycarbonate, graphite, gas permeability, interfacial interactions

For citation: Magomedov G.M., Kudrov Yu.V., Dolbin I.V., Dolbin I.I. The physical meaning of the tortuosity of the trajectory of penetrant gas molecules and its influence on the gas permeability of nanocomposites. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):32–36. (In Russ.).

Введение

Процессы газопереноса в полимерных материалах играют существенную роль при их промышленном применении. Так, указанное свойство становится критическим при использовании этих материалов в качестве тары для пищевой промышленности, получении защитных пленочных покрытий для металлических изделий и т. п. Поскольку полимеры обладают довольно высокой газопроницаемостью, для ее снижения применяют ряд технологических методов. К числу наиболее распространенных относится наполнение полимеров твердофазными частицами, т. е. применение полимерных композитов. Наиболее эффективными в этом отношении являются сильно анизотропные частицы с размерами в нанометровом интервале [1, 2]. Этот эффект исследовался достаточно широко и для его описания разработано несколько теоретических моделей [1–3]. В рамках одной из таких моделей получено следующее соотношение [1]:

$$\frac{P_n}{P_m} = \frac{1 - \varphi_n}{\tau}, \quad (1)$$

где P_n и P_m – коэффициенты газопроницаемости нанокомпозита и матричного полимера, соответственно (величину P_n/P_m можно трактовать как относительный коэффициент газопроницаемости нанокомпозита), φ_n – относительное объемное содержание нанонаполнителя, τ – фактор извилистости траектории молекулы газа-пенетранта.

Величина τ представляет собой отношение расстояний, проходимых молекулой газа в полимере d_n и в нанокомпозите d_n [1]:

$$\tau = \frac{d_n}{d_n}. \quad (2)$$

Важную роль в процессе газопереноса для композитных материалов играют межфазные эффекты, которые можно количественно охарактеризовать структурным сродством нанонаполнителя и полимерной матрицы, определяемым степенью аффинности компонент нанокомпозита [4]. Целью настоящей работы является структурная трактовка величины фактора извилистости и ее влияние на относительный коэффициент газопроницаемости нанокомпозитов на основе полимер/2D-нанонаполнителя.

Экспериментальная часть

В качестве матричного полимера использован поликарбонат на основе бисфенола А (ПК) марки Calibre 201-22 производства фирмы Dow Chemicals (США), имеющий показатель текучести расплава (ПТР) 22 г/10 мин при температуре 573 К и плотность 1200 кг/м³. Среднечисловая и средневесовая молекулярные массы этого сорта ПК, определенные методом массовой газовой хроматографии с калибровкой по полистиролу, составили 27,1 и 50,4 кг/моль соответственно [2].

Графит (Гр) в виде хлопьев с улучшенной поверхностью марки 3775 получен от фирмы Asbury Carbon (США) и имел удельную поверхность 29 м²/г [2]. В качестве нанонаполнителя также использован термически восстановленный графен (ТВГ), полученный согласно процедуре [2], который имел удельную поверхность ~ 800 м²/г [2].

Нанокомпозиты ПК/Гр и ПК/ТВГ приготовлены смешиванием компонент в расплаве на двухшнековом микроэкструдере DACA при температуре 503–523 К. Содержание графита составило 1–12 масс. % и ТВГ – 0,25–3,0 масс. %. Образцы для испытаний получены методом экструзии на этом же микроэкструдере при температуре 538 К [2].

Коэффициенты газопроницаемости исследуемых образцов по азоту определены на образцах в форме диска диаметром 42 мм в камере с перепадом давления 1 атм. [2].

Результаты и обсуждение

Структурное сродство нанонаполнителя и полимерной матрицы количественно можно охарактеризовать разностью фрактальных размерностей поверхности нанонаполнителя d_n и полимерной матрицы d_f , т. е. величиной разности Δd_f , равной [4]:

$$\Delta d_f = |d_n - d_f|. \quad (3)$$

Наиболее просто параметр Δd_f определяется с помощью следующего уравнения [5]:

$$\Delta d_f = b_\alpha^{-1}, \quad (4)$$

где b_α – безразмерный параметр, характеризующий уровень межфазной адгезии полимерная матрица-нанонаполнитель.

В свою очередь, одним из вариантов определения параметра b_α является использование следующего перколяционного соотношения [4]:

$$\frac{E_n}{E_m} = 1 + 11(2,92b_\alpha\varphi_n)^{1,7}, \quad (5)$$

где E_n и E_m – модули упругости нанокомпозита и матричного полимера соответственно (отношение E_n/E_m принято называть степенью усиления нанокомпозита), а значения φ_n приняты по данным работы [2].

На рисунке 1 приведены зависимости фактора извилистости τ , определенного согласно уравнению (1), от величины Δd_f^4 (такая форма зависимости $\tau(\Delta d_f)$ использована с целью ее линеаризации) для нанокомпозитов ПК/Гр и ПК/ТВГ. Как следует из данных этого рисунка, для обоих типов рассматриваемых нанокомпозитов зависимости $\tau(\Delta d_f^4)$ оказались линейными и показали увеличение τ по мере роста Δd_f , т.е. по мере ухудшения структурного сродства поверхности нанонаполнителя и полимерной матрицы, причем эти зависимости очень сильные – в четвертой степени. Это означает, что полученная форма зависимости предполагает более сильное влияние структурного фактора Δd_f на относительный коэффициент газопроницаемости по сравнению с содержанием нанонаполнителя φ_n . При полном структурном сродстве поверхности нанонаполнителя и полимерной матрицы, т.е. при условии $d_n=d_f$ и $\Delta d_f=0$ величина $\tau=1$ и тогда $P_n/P_m=(1-\varphi_n)$ согласно уравнению (1). Это означает отсутствие влияния межфазных эффектов и снижение P_n/P_m только как результат введения нанонаполнителя. Для описания влияния Δd_f на величину τ можно использовать следующие эмпирические уравнения:

$$\tau = 1 + 1,55\Delta d_f^4 \quad (6)$$

для нанокомпозитов ПК/Гр и

$$\tau = 1 + 8,0\Delta d_f^4 \quad (7)$$

для нанокомпозитов ПК/ТВГ.

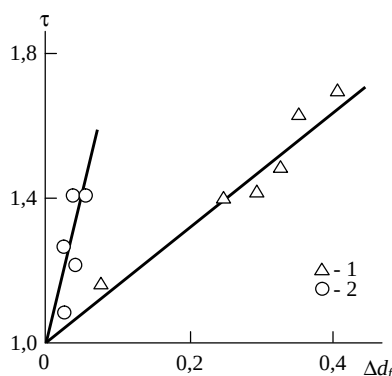


Рисунок 1 – Зависимости фактора извилистости траектории молекул газа пенетранта τ от степени аффинности структуры Δd_f для нанокомпозитов ПК/Гр (1) и ПК/ТВГ (2)

Следует отметить хорошее соответствие между экспериментальными величинами, полученными согласно уравнению (1) и теоретически рассчитанными по уравнениям (6) и (7). Их среднее расхождение составляет 7 %. Различающие коэффициенты в уравнениях (6) и (7) обусловлены разной степенью дисперсности агрегатов графита и графена вследствие различий в их содержании и размере, что предложили также и авторы работы [2].

На рисунке 2 приведено сравнение полученных экспериментально и рассчитанных теоретически согласно уравнениям (1), (6) и (7) величин относительного коэффициента газопроницаемости P_n/P_m и $(P_n/P_m)^{теор}$ для рассматриваемых нанокомпозитов. Как следует из этого сравнения, получено хорошее соответствие экспериментальных и теоретических результатов (их среднее расхождение составляет 6 %, сопоставимое с экспериментальной погрешностью определения коэффициента газопроницаемости полимерных нанокомпозитов [2]), что предполагает корректность предложенной трактовки.

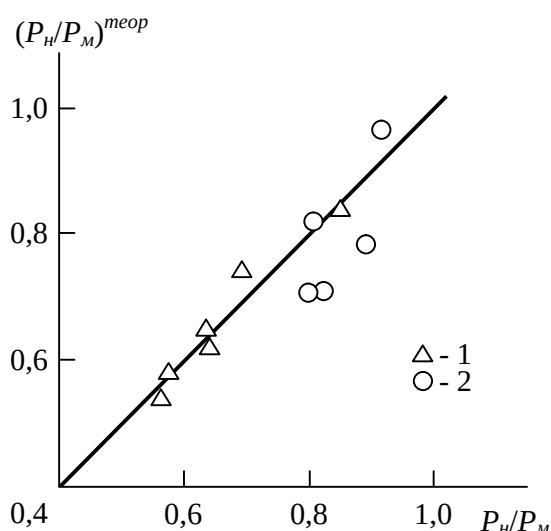


Рисунок 2 – Сравнение полученных экспериментально P_n/P_m и рассчитанных теоретически согласно уравнениям (1), (6) и (7) $(P_n/P_m)^{теор}$ величин относительного коэффициента газопроницаемости для нанокомпозитов ПК/Гр (1) и ПК/ТВГ (2). Прямая линия показывает соотношение 1:1

Выводы

Следовательно, результаты настоящей работы продемонстрировали существенное влияние структурного фактора – аффинности компонент – на процессы газопереноса для нанокомпозитов и полимер/2D-нанонаполнители. Это влияние усиливается по мере повышения дисперсности и снижения размеров агрегатов нанонаполнителя. При полном структурном сродстве компонент нанокомпозитов их относительная газопроницаемость определяется только содержанием нанонаполнителя. В свою очередь, снижение указанного сродства, характеризуемое ростом параметра Δd_f , приводит к уменьшению коэффициента газопроницаемости нанокомпозита (по сравнению с этим показателем для матричного полимера). Полученные результаты показали, что основным фактором снижения газопроницаемости нанокомпозита по отношению к матричному полимеру выступают эффекты на межфазной границе полимерная матрица-нанонаполнитель.

Библиография

1. Bharadwaj R.K. Modeling the barrier properties of polymer – layered silicate nanocomposites // Macromolecules. 2001. V. 34, N 26. P. 9189–9192.
2. Kim H., Macosco C.W. Processing-property relationship of polycarbonate/grapheme composites // Polymer. 2009. V. 50, N 13. P. 3797–3809.
3. Долбин И.И., Кумышева Ю.А., Казанчева Л.А., Долбин И.В., Давыдова В.В. Пропорциональность содержания нанонаполнителя и межфазных областей в полимерных нанокомпозитах // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2025. Т. 15, № 3. С. 34–39.

4. Козлов Г.В., Долбин И.В. Влияние аффинности компонент нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки на их свойства // *Физикохимия поверхности и защита материалов*. 2022. Т. 58, № 5. С. 521–525.

5. Атлуханова Л.Б., Долбин И.В. Взаимосвязь свойств и степени дисперсии нанонаполнителя для нанокомпозитов полимер/углеродные нанотрубки // *Наноиндустрия*. 2024. Т. 17, № 1. С. 74–79.

References

1. Bharadwaj R.K. Modeling the barrier properties of polymer – layered silicate nanocomposites. *Macromolecules*. 2001;34(26):9189–9192.

2. Kim H., Macosco C.W. Processing-property relationship of polycarbonate/grapheme composites. *Polymer*. 2009;50(13):3797–3809.

3. Dolbin I.I., Kumysheva Yu.A., Kazancheva L.A., Dolbin I.V., Davydova V.V. Proportionality of the content of nanofiller and interfacial regions in polymer nanocomposites. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings the Kabardino-Balkarian State University*. 2025;15(3):34–39. (In Russ.).

4. Kozlov G.V., Dolbin I.V. The effect of the affinity of components of polymer/carbon nanotube nanocomposites on their properties. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2022;58(5):977–980.

5. Atlukhanova L.B., Dolbin I.V. The interconnection of properties and dispersion degree of nanofiller for nanocomposites polymer/carbon nanotube. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2024;17(1):74–79. (In Russ.).

ФИЗИКА

Научная статья

УДК 524.1-73:539.1.07

Определение вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей сцинтилляционным методом с использованием стратосферного спутника CubeSat 3U

Мартин Батарбиевич Масаев¹, Альберт Мусаевич Гангапшев², Аслан Узеирович Заммиев³, Кантемир Чамалович Бжихатлов⁴, Даниэль Эдуардович Болиев⁵, Якуб Ахматович Аккизов⁶

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

²Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия

^{3,4}Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

^{5,6}ГБОУДАТ «Солнечный город», Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹masmartin@mail.ru

²gangapsh@list.ru

³zammoev@mail.ru

⁴haosit13@mail.ru

⁵anielboliev87@gmail.com

⁶akubakkizov32@gmail.com

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты разработки и экспериментальной реализации метода определения вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей с применением стратосферного спутника формата CubeSat 3U, оснащенного детектором на основе пластикового сцинтиллятора. Получено распределение интенсивности мюонной компоненты ВКЛ в диапазоне высот до 23,4 км. Основной максимум темпа счета, составивший 1270 имп/мин, зафиксирован на высоте 17 км. Вторая локальная вариация темпа счета (820 имп/мин) обнаружена на высоте 13,7 км. Зарегистрированные вариации интенсивности интерпретируются как следствие локальной генерации широких атмосферных ливней.

Ключевые слова: вторичные космические лучи, мюонная компонента, сцинтилляционный детектор, стратосферный спутник CubeSat, солнечная активность, широкий атмосферный ливень

Для цитирования: Масаев М.Б., Гангапшев А.М., Заммиев А.У., Бжихатлов К.Ч., Болиев Д.Э., Аккизов Я.А. Определение вариаций высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей сцинтилляционным методом с использованием стратосферного спутника CubeSat 3U // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 37–42.

PHYSICS

Original article

Determination of high-altitude distribution variations of the muon component of secondary cosmic rays by the scintillation method using a CubeSat 3U stratospheric satellite

Martin B. Masaev¹, Albert M. Gangapshiev², Aslan U. Zammoev³, Kantemir Ch. Bzhikhatlov⁴, Daniel E. Boliev⁵, Yakub A. Akkizov⁶

^{1,2}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nalchik, Russia

²Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{3,4}Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kabardino-Balkarian Republik, Nalchik, Russia

^{5,6}State Educational Institution of Additional Education "Sunny City", Kabardino-Balkarian Republik, Nalchik, Russia

¹masmartin@mail.ru

²gangapsh@list.ru

³zammoev@mail.ru

⁴haosit13@mail.ru

⁵anielboliev87@gmail.com

⁶akubakkizov32@gmail.com

Abstract. This paper presents the results of the development and experimental implementation of a method for determining the variations in the altitude distribution of the muon component of secondary cosmic rays using a CubeSat 3U stratospheric satellite equipped with a plastic scintillator detector. The distribution of the intensity of the muon component of SCR in the altitude range up to 23.4 km has been obtained. The main maximum of the counting rate, which was 1270 imp/min, was recorded at an altitude of 17 km. The second local variation of the counting rate (820 imp/min) was detected at an altitude of 13.7 km. The recorded variations in intensity are interpreted as a result of the local generation of wide-area atmospheric showers.

Keywords: secondary cosmic rays, muon component, scintillation detector, stratospheric satellite CubeSat, solar activity, extensive air shower

For citation: Masaev M.B., Gangapshv A.M., Zammoev A.U., Bzhikhatlov C.Ch., Boliev D.E., Akkizov Ya.A. Determination of high-altitude distribution variations of the muon component of secondary cosmic rays by the scintillation method using a CubeSat 3U stratospheric satellite // Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(2):37–42. (In Russ.).

Введение

Изучение высотного распределения мюонной компоненты вторичных космических лучей (ВКЛ) в контексте вариаций солнечной активности представляет значительный фундаментальный и прикладной интерес [1–5]. Актуальность данных исследований обусловлена необходимостью решения ряда задач, среди которых:

1. **Проведение оценки радиационной безопасности авиации.** Пространственное распределение ВКЛ является критическим параметром для оценки радиационной нагрузки на высотах магистральных авиалиний (8–12 км), где наблюдается максимум интенсивности мюонной компоненты [3, 6].

2. **Осуществление мониторинга солнечной активности.** Регистрация вариаций мюонного потока позволяет отслеживать 11-летние циклы активности Солнца и прогнозировать магнитные бури, оказывающие дестабилизирующее воздействие на навигационное оборудование и системы связи [6, 7].

3. **Исследование гелиосферных возмущений.** В периоды минимума солнечной активности высокоскоростной солнечный ветер выступает основным фактором возмущения межпланетного магнитного поля, модулирующего галактический поток космических лучей [5, 7].

Первичные космические лучи (протоны и ядра тяжелых элементов), взаимодействуя с атмосферой Земли на высотах 80–90 км, инициируют каскад вторичных частиц [2, 4]. Жесткая мюонная компонента ВКЛ, обладающая высокой проникающей способностью, достигает поверхности Земли, формируя существенную долю естественного радиационного фона [3]. Максимумы интенсивности мюонной компоненты традиционно приходятся на высоты 12–17 км (давление ~ 80 тор), в непосредственной близости от которых (8–12 км) располагаются эшелоны полетов гражданской авиации [8]. В периоды повышенной солнечной активности на данных высотах наблюдается генерация широких атмосферных ливней (ШАЛ) с интенсивностью до 10^{10} частиц [2, 5].

Цель работы: разработка и экспериментальная реализация метода определения вариаций высотного распределения мюонной компоненты ВКЛ с использованием стратосферного спутника формата CubeSat 3U, оснащенного сцинтилляционным детектором, с обеспечением регистрации данных в режиме реального времени.

Методика и оборудование эксперимента

В ходе эксперимента в качестве основного был использован телеметрический метод передачи данных в режиме реального времени с интервалом дискретизации 5 с. В качестве регистрирующего элемента применялся пластиковый органический сцинтиллятор на основе полистирола, легированного первичным активатором РРО и вторичным сместителем спектра РОРОР, габаритами $12 \times 12 \times 3$ см³ (площадь регистрирующей поверхности 144 см²).

Основные характеристики детектора: время высвечивания: ≤ 5 нс; световыход: 50–60 %; удельное энерговыделение мюонов: 2 МэВ·см²/г; полное энерговыделение при толщине 3 см: 6 МэВ; эффективность регистрации заряженных частиц: ~ 100 %. Сбор полезного сигнала от сцинтиллятора осуществлялся через оптоволокно с помощью кремниевого фотоэлектронного умножителя (SiPM) модели PM3325-WB-D0.

Оценочный расчет показал, что при средней интенсивности мюонов на уровне моря 1 мюон/(см²·мин) = 0,0167 Бк/см² [2, 3], для площади детектора 144 см² ожидаемый начальный темп счета составляет:

$$N = 144 \text{ см}^2 \times 1 \text{ мюон}/(\text{см}^2 \cdot \text{мин}) = 144 \text{ соб./мин} = 2,4 \text{ Бк.}$$

С учетом высоты старта над уровнем моря (169 м) ожидаемое начальное увеличение темпа счета не превышает ~ 3 –5 %.

Высота полета определялась барометрическим методом с использованием гипсометрической формулы:

$$h = h_0 + \frac{RT_{avg}}{gM} \ln \left(\frac{P_0}{P} \right),$$

где h – искомая высота (м), h_0 – опорная высота (м) = 169 м (высота над уровнем моря в точке старта), R – универсальная газовая постоянная (8,314462618 Дж/моль К), T_{avg} – средняя абсолютная температура (в Кельвинах) слоя воздуха между высотами h и h_0 , т. е. среднее арифметическое температур на

двух уровнях: $T_{avg} = \frac{T_0 + T}{2}$, где T_0 – температура на уровне $h_0 = 24$ °C (температура в точке старта),

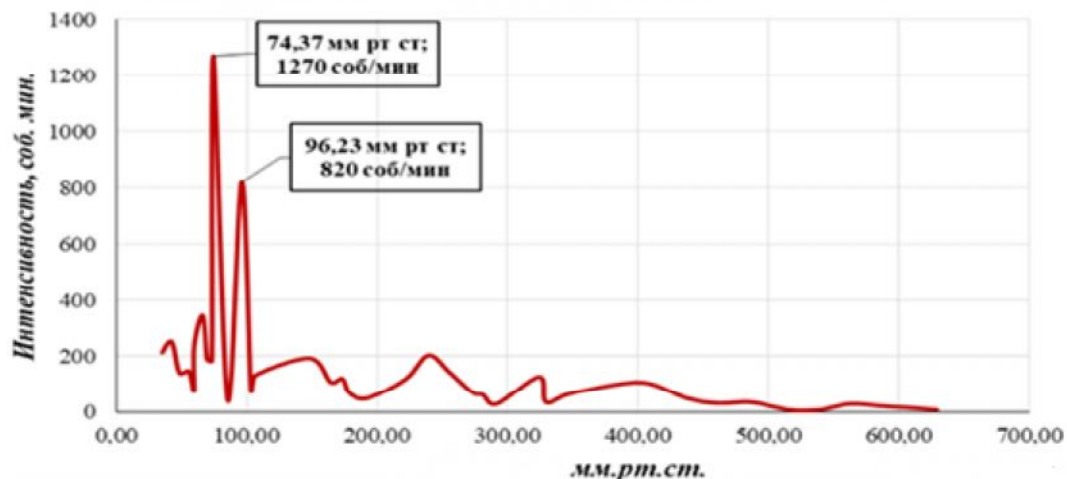
T – температура на уровне h , g – ускорение свободного падения ($\sim 9,80665$ м/с²), M – молярная масса сухого воздуха ($\sim 0,0289644$ кг/моль), P_0 – давление на опорной высоте h_0 (например, на уровне моря) = 98611 Па (давление в точке старта = 739,58 тор), P – давление на высоте h (1 тор = 0,75 мбар).

В исследовании использовалась платформа стандарта CubeSat формата 3U (модуль 1U имеет габариты $10 \times 10 \times 10$ см и массу до 1,33 кг). Рабочий объем спутника, включая конструктивы и полезную нагрузку (детектор), был термостатирован с использованием нагревательной ленты с термодатчиком и теплоизолирующего материала.

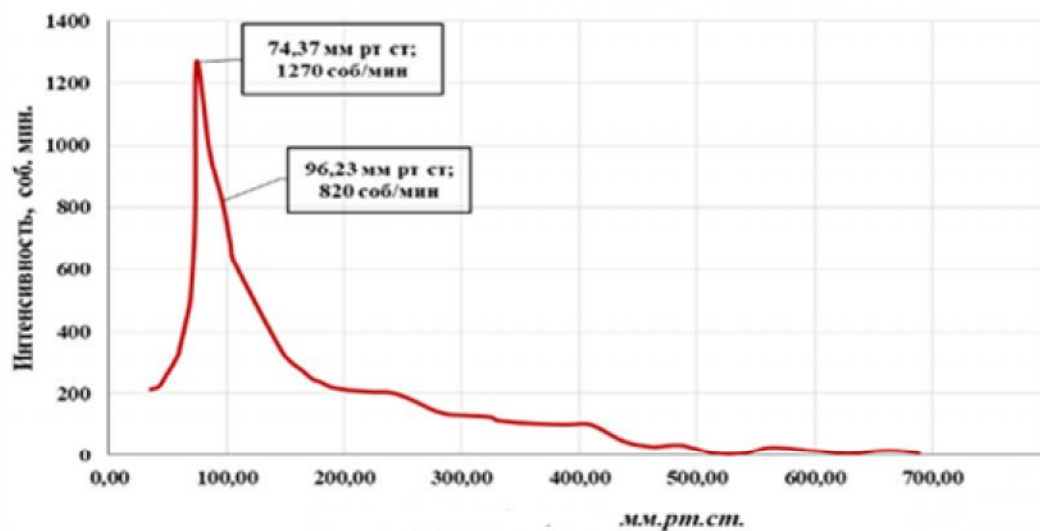
Результаты эксперимента

Экспериментальные измерения были проведены в сентябре 2025 года (период с 17 по 23 сентября) в рамках Всероссийского чемпионата по программе «Стратосферный спутник-2025» в наукограде Черноголовка (Московская область) при поддержке Госкорпорации «Роскосмос» и организатора ООО «Стратонавтика». Максимальная достигнутая высота подъема составила 23 408 м. Общее количество измерений на этапе подъема: 470 (с шагом ~ 50 м по высоте).

Основные результаты измерений высотного распределения интенсивности мюонов систематизированы в таблице 1 и визуализированы на рисунке 1.



а)



б)

Рисунок 1 – Исходный (а) и итоговый (б) графики зависимости темпа счета мюонной компоненты от величины атмосферного давления после обработки

Из данных *таблицы 1* следует, что максимум интенсивности с темпом счета 1270 имп/мин зафиксирован на высоте 17 км при давлении 74,37 тор. На высоте 13,7 км обнаружен вторичный пик интенсивности, с темпом 820 имп/мин при давлении 96,23 тор. Эти значения вариаций темпа счета существенно превышают классические данные кривой Регенера–Пфотцера (максимум ~270 имп/мин на высоте 16 км) [8]. По результатам измерений установлено, что зависимость температуры окружающей среды от высоты показывает характерное снижение до -57°C на отметке 17 км, что полностью согласуется с моделью стандартной атмосферы.

Таблица 1 – Результаты измерений высотного распределения мюонной компоненты

Высота, км	Давление, мм рт. ст.	Темп счета, имп/мин	Температура, $^{\circ}\text{C}$
0,45 (старт)	739,58	~150	+24
13,7	96,23	820	-55
17,0	74,37	1270 (макс.)	-57
23,4	25,80	450	-52

Обсуждение результатов

Наблюдаемое превышение интенсивности мюонной компоненты над эталонными значениями (в 4,7 раза в точке максимума) интерпретируется как следствие эффекта солнечной модуляции – возрастания потока ВКЛ в периоды солнечных вспышек [6–9]. В период проведения эксперимента (17–23 сентября 2025 г.), согласно данным Московского нейтронного монитора (ИЗМИРАН, г. Троицк), фиксировалась высокая вариативность солнечной активности в рамках 25-го 11-летнего цикла (начало: декабрь 2019 г., прогнозируемое завершение: ~ 2030 г.) [6]. Выявление двух областей повышенной интенсивности свидетельствует о локальной генерации широких атмосферных ливней субатомных частиц (ШАЛ):

1. Первая область (17 км, 1270 имп/мин) коррелирует с классическим положением максимума Пфотцера [8].

2. Вторая область (13,7 км, 820 имп/мин) указывает на дополнительную каскадную генерацию ливня.

Полученные данные согласуются с гипотезой о том, что в высотном диапазоне 13–17 км вероятность зарождения и развития ШАЛ является максимальной [2, 5].

Заключение

1. Разработана и конструктивно реализована измерительная установка на базе сцинтилляционного детектора в стандарте стратосферного спутника CubeSat 3U. Выполнен успешный экспериментальный запуск, с регистрацией высотного распределения ВКЛ до высоты 23,4 км.

2. Зарегистрирован максимум интенсивности 1270 имп/мин на высоте 17 км, что в 4,7 раза превышает эталонные данные кривой Регенера – Пфотцера. Обнаружена значительная локальная вариация интенсивности (820 имп/мин) на высоте 13,7 км, свидетельствующая о генерации широких атмосферных ливней.

3. Экспериментально подтверждено наличие эффекта солнечной модуляции интенсивности ВКЛ в период максимума 25-го цикла солнечной активности. Разработанный методический подход перспективен для мониторинга космической погоды, регистрации вариаций солнечной активности и оценки радиационной обстановки при авиационных перелетах.

Библиография

1. Иваненко Д.Д. Космические лучи и новые «полутяжелые» частицы // Успехи физических наук. 1938. Т. 19, № 3. С. 322–352.
2. Мурзин В.С. Физика космических лучей: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1970. 285 с.
3. Сокуров В.Ф. Физика космических лучей: космическая радиация. Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. 188 с.
4. Панасюк М.И. Странники Вселенной или Эхо Большого взрыва. М.: Век 2, 2005. 272 с.
5. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975. 464 с.
6. Горчаков Е.В., Базилевская Г.А. Измерения интенсивности заряженных частиц после хромосферной вспышки 7 июля 1958 г. // Искусственные спутники Земли. 1961. № 8. С. 84–86.
7. Мирошниченко Л.И. Космические лучи. Физическая энциклопедия. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1990. С. 471–474.
8. Regener E., Pfozter V. Vertical intensity of cosmic rays // Nature. 1938. V. 141. P. 377–378.
9. Гинзбург В.Л. Космические лучи: 75 лет исследований и перспективы на будущее // Земля и Вселенная. 1988. № 3. С. 3–9.

References

1. Ivanenko D.D. Cosmic Rays and New "Semi-Heavy" Particles. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk = Physics-Uspekhi*. 1938;19(3):322–352. (In Russ.).
2. Murzin V.S. Physics of Cosmic Rays: A Textbook. Moscow: Moscow State University Press; 1970. 285 p. (In Russ.).
3. Sokurov V.F. Physics of Cosmic Rays: Cosmic Radiation. Rostov-an-Don: Feniks; 2005. 188 p. (In Russ.).

4. Panasyuk M.I. Wanderers of the Universe, or Echo of the Big Bang. Moscow: Vek 2; 2005. 272 p. (In Russ.).
5. Dorman L.I. Experimental and Theoretical Foundations of Cosmic Ray Astrophysics. Moscow: Nauka; 1975. 464 p. (In Russ.).
6. Gorchakov E.V., Bazilevskaya G.A. Measurements of the intensity of charged particles after the chromospheric flare of July 7, 1958. *Iskusstvennye Sputniki Zemli = Artificial Earth Satellites*. 1961;8:84–86. (In Russ.).
7. Miroshnichenko L.I. Cosmic rays. Physical Encyclopedia. Vol. 2. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1990. P. 471–474. (In Russ.).
8. Regener E., Pfotzer V. Vertical intensity of cosmic rays. *Nature*. 1938;141:377–378.
9. Ginzburg V.L. Cosmic rays: 75 years of research and future prospects // *Earth and the Universe*. 1988. No. 3. pp. 3–9. (In Russ.).

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 536.34

Интенсификация теплообмена посредством электроконвекции

Николай Андреевич Шаталов¹, Елена Ивановна Толмачева², Андрей Федорович Шаталов³

¹Ставропольский колледж связи имени Героя Советского Союза В.А. Петрова, Ставропольский край, г. Ставрополь, Россия

²Северо-Кавказский социальный институт, Ставропольский край, г. Ставрополь, Россия

^{2,3}Ставропольский государственный педагогический институт, Ставропольский край, г. Ставрополь, Россия

¹nas777@mail.ru

²elena_kamenichenko@mail.ru

³afs777@mail.ru

Аннотация. Найдена зависимость коэффициента теплоотдачи в системе игла-плоскость. Проанализирована зависимость коэффициента теплоотдачи от межэлектродного напряжения при различной ориентации по отношению к вектору массовых сил. Для получения максимального прироста коэффициента теплоотдачи плоского нагревателя, необходимо обеспечить взаимосвязь между поперечным размером охлаждаемой поверхности и межэлектродным расстоянием.

Ключевые слова: теплообмен, электроконвекция, электрогидродинамический поток, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи

Для цитирования: Шаталов Н.А., Толмачева Е.И., Шаталов А.Ф. Интенсификация теплообмена посредством электроконвекции // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 43–48.

PHYSICS

Original article

Intensification of heat exchange through electrical convection

Nikolay A. Shatalov¹, Elena I. Tolmacheva², Andrey F. Shatalov³

¹Stavropol College of Communications named after Hero of the Soviet Union V.A. Petrov, Stavropol Territory, Stavropol, Russia

²North Caucasus Social Institute, Stavropol Territory, Stavropol, Russia

^{2,3}Stavropol State Pedagogical Institute, Stavropol Territory, Stavropol, Russia

¹nas777@mail.ru

²elena_kamenichenko@mail.ru

³afs777@mail.ru

Abstract. The dependence of the heat transfer coefficient in a needle-to-plane electrode system has been established. The relationship between the heat transfer coefficient and the applied interelectrode voltage was analyzed for different orientations relative to the body force vector. To achieve the maximum increase in the heat transfer coefficient of a flat heater, it is necessary to ensure a specific relationship between the transverse dimension of the cooled surface and the interelectrode distance.

Keywords: heat exchange, electroconvection, electrohydrodynamic flow, heat flow, heat transfer coefficient

For citation: Shatalov N.A., Tolmacheva E.I., Shatalov A.F. Intensification of heat exchange through electrical convection. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026; 16(2):43–48. (In Russ.).

Постановка задачи

Эффективный способ интенсификации теплообмена в жидкостях и газах – это создание их принудительного движения. В литературе ранних лет показано, что коэффициент теплоотдачи α – основной параметр, характеризующий интенсивность теплообмена, – является функцией относительной скорости нагретой поверхности [1–3]

$$\alpha = \alpha(u). \quad (1)$$

При малых скоростях число Нуссельта, определяемое через коэффициент теплоотдачи, $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$, пропорционально числу Рейнольдса $Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\eta}$ в степени $\frac{1}{2}$ [2]. Поэтому достаточно точно можно считать, что выполняется зависимость вида:

$$\alpha = \alpha_0 + h \cdot (|u|)^{0,5}, \quad (2)$$

где h – константа, определяемая условиями теплообмена и формой нагретой поверхности. Для тонких нагревателей эта константа определяется выражением $h = \sqrt{\pi R c \lambda}$. Для плоских поверхностей коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{Nu_{ж,l} \lambda}{l}, \quad (3)$$

где $Nu_{ж,l}$ – число Нуссельта, λ – коэффициент теплопроводности среды, l – размер меньшей стороны пластины.

Решались задачи:

- 1) найти оптимальное соотношение между числом игольчатых электродов, межэлектродным напряжением и расстоянием от охлаждаемой поверхности до острия игольчатых электродов, при котором наблюдается максимум интенсификации теплообмена;
- 2) определить эффективность применения ребер в условиях принудительного течения жидкости под действием электрического поля, которое принципиально отличается от течения, создаваемого насосами.

Методика эксперимента

В представленной работе для создания принудительного движения трансформаторного масла использовалось электрическое поле [4–8].

В опытах поверхности, не контактирующие с маслом, теплоизолировались. Электрическое поле создавалось подведением постоянного регулируемого напряжения к противоэлектродам и нагретым поверхностям, расстояния между ними изменяли. Измерения, расчеты и анализ погрешностей проводили по методикам, изложенным в [9–12].

Интегральный коэффициент теплоотдачи рассчитывался по стандартной методике с использованием соотношения:

$$\alpha = \frac{q}{T_{cm} - T}, \quad (4)$$

где q – удельный тепловой поток к жидкости, находимый по мощности тока в пластине-нагревателе, T_{cm} – температура нагревателя, определяемая методом термометра сопротивления, а также медь-константановыми термopарами, T – температура масла на удалении от нагретой поверхности, фиксируемая ртутным термометром с ценой деления 0,5 град.

Использовался также относительный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha^* = \alpha_{эл} / \alpha_{грав}, \quad (5)$$

где $\alpha_{эл}$ и $\alpha_{грав}$ – интегральные коэффициенты теплоотдачи при электрической и гравитационной конвекции, соответственно.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Первая серия опытов была проведена с противозэлектродами в виде игл. Они располагались над охлаждаемой плоской поверхностью. На рисунке 1 показано относительное увеличение коэффициента α^* . При напряжениях до 3 кВ параметр α^* прямо растет с увеличением числа электродов.

При больших напряжениях зависимость оказывается более сложной. Характерно, что при малых межэлектродных расстояниях, начиная с 4 кВ зависимость $\alpha^*(U)$ заметно ослабевает, при больших расстояниях, в рассмотренном диапазоне напряжений, она приближается к линейной.

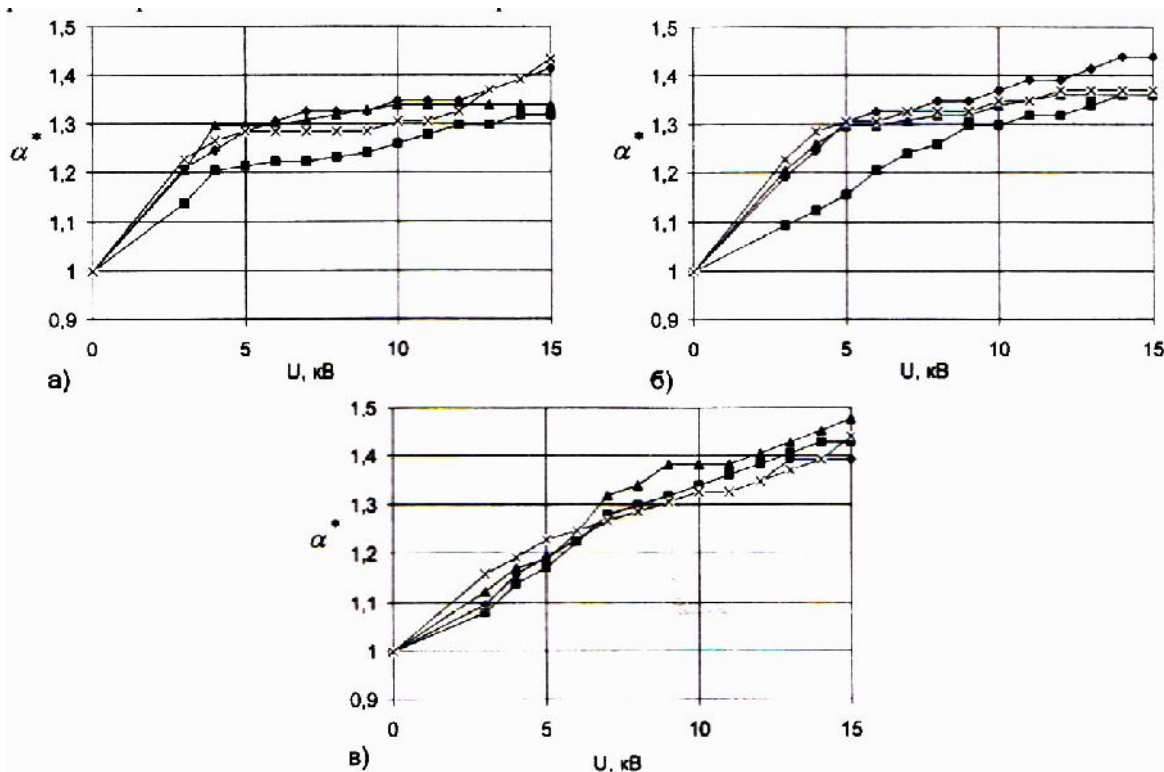


Рисунок 1 – Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи α от межэлектродного расстояния и количества игольчатых электродов: а) $l_0 = 3$ мм; б) $l_0 = 10$ мм; в) $l_0 = 20$ мм.

Количество игл: ■ – $n = 1$; ▲ – $n = 2$; ◆ – $n = 3$, × – $n = 4$

Существенное влияние на функциональную зависимость $\alpha^*(U)$ оказывают расстояния l_0 между острием игл и нагретой поверхностью. Так, уменьшение межэлектродного расстояния сопровождается уменьшением роста относительного коэффициента теплоотдачи.

Обнаруженная зависимость на первый взгляд противоречит тому, что с ростом напряженности электрического поля интенсивность электроконвективных явлений, а стало быть, и коэффициент теплоотдачи должны возрастать. С уменьшением расстояния напряженность электрического поля между электродами растет, однако объем области, где происходит электроконвективное течение, локализован между острием илы и поверхностью охлаждения, то есть связан не только с напряженностью поля, но и с межэлектродным расстоянием [3, 4]. В объеме где происходит течение, его развитость оценивается безразмерным числом [4]:

$$\Gamma = l_0 \sigma / (v \epsilon \epsilon_0), \quad (6)$$

где σ – удельная электрическая проводимость жидкости, v – скорость потоков.

Это число дает отношение времени пересечения жидкостью межэлектродного промежутка ко времени релаксации электрического заряда. В объеме, размер которого соизмерим с межэлектродным расстоянием, течение охватывает всю жидкость, когда число Γ принимает значения более 90 [4].

В нашем случае размеры сосуда велики по отношению к межэлектродному промежутку, поэтому течению подвержена лишь часть объема между иглой и поверхностью.

Радиус области, охваченной течением в радиальном к оси иглы направлении, определяется формулой [4]:

$$R = (0,75 - 1) \cdot S. \quad (7)$$

В свою очередь, размер S в осевом направлении пропорционален межэлектродному напряжению U :

$$S = 0,016 \cdot U \quad (8)$$

и при $\Gamma = 90$ занимает только межэлектродный промежуток, поэтому дальнейшее повышение напряжения уже не вызывает заметного роста величины R и соответственно коэффициента теплоотдачи.

Очевидно, уменьшение межэлектродного расстояния l_0 должно приводить к уменьшению площади нагревателя, обтекаемого электроконвективными потоками и, соответственно, к уменьшению интегрального коэффициента теплоотдачи.

В случае с несколькими игольчатыми электродами, ввиду зависимости S и R от напряжения U , между электродами при высоких значениях напряжения наблюдается сложное взаимодействие между гравитационными и ЭГД потоками, а также взаимодействие ЭГД потоков соседних игольчатых электродов между собой, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи.

На зависимость коэффициента теплоотдачи оказывает также влияние ориентация электродной системы по отношению к вектору массовых сил (рисунок 2).

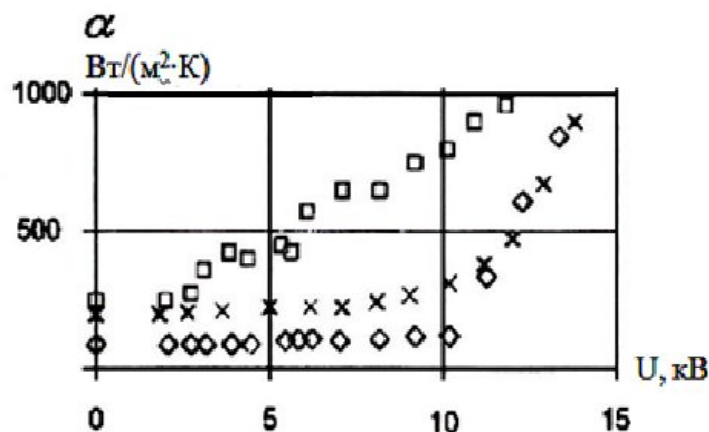


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от межэлектродного напряжения при различной ориентации по отношению к вектору массовых сил:
 □ – нагреватель снизу, × – нагреватель сбоку, ◇ – нагреватель сверху

При расположении нагретой поверхности сверху от иглы гравитационная конвекция отсутствует, теплые слои удерживаются у нагревателя силами плавучести, а теплообмен без поля осуществляется теплопроводностью. Подача на электродную систему напряжения вплоть до 10 кВ не меняет коэффициента теплоотдачи. При дальнейшем повышении напряжения коэффициент α резко нарастает по степенной зависимости, далее по линейной с угловым коэффициентом порядка 0.06, вплоть до напряжений 25–30 кВ. Чтобы привести нагретые слои в движение у горячей поверхности ЭГД поток должен иметь достаточную кинетическую энергию.

При расположении нагретой пластины снизу наблюдается сложное взаимодействие конвективных и электрогидродинамических потоков, результатом которого является уменьшение порогового напряжения, при котором начинает интенсифицироваться теплообмен до 2500 В и линейный рост коэффициента α вплоть до его стабилизации.

При вертикальном расположении нагретой пластины, а иглы сбоку от нее, между собой взаимодействуют горизонтальные электроконвективные и вертикальные гравитационные потоки (рисунок 3).

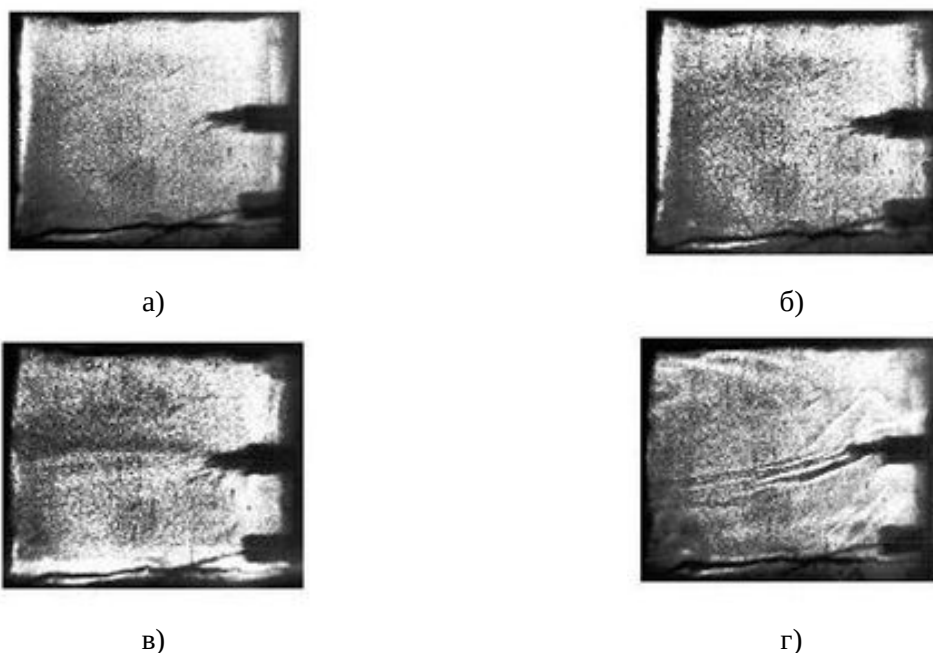


Рисунок 3 – Фотографии электроконвективных и гравитационных потоков, создаваемых игольчатым электродом при вертикальном расположении плоского нагревателя.
Потенциал иглы: а) 5000 В; б) 7500 В; в) 10000 В; г) 15000 В

В этом случае нижняя часть пластины имеет локальный перегрев по отношению к верхней. Интегральный коэффициент теплоотдачи растет пропорционально квадрату межэлектродного напряжения.

Выводы

Из изложенного экспериментального материала можно сделать следующие выводы: электроконвекция – эффективное средство интенсификации теплообменных процессов. Для достижения максимального увеличения коэффициента теплоотдачи плоского нагревателя требуется, чтобы между поперечным размером охлаждаемой поверхности и межэлектродным расстоянием была связь, определяемая формулами (7) и (8). Выполнение этих соотношений можно достичь расположением не одной, а нескольких игл. Путем изменения межэлектродного напряжения можно в широких пределах регулировать рост коэффициента теплоотдачи, а изменениями расстояния между острием иглы и плоскостью – величину углового коэффициента $\alpha(U)$.

Библиография

1. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
2. Теплотехника: учебник / под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова, Г.М. Камфера и др. М.: Высшая школа, 2002. 671 с.
3. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчёт ребренных поверхностей. М.: Энергия, 1977. 254 с.
4. Стишков Ю.А., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: ЛГУ, 1989. 119 с.
5. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 319 с.
6. Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроконвективные явления и интенсификация теплообмена // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 51–62.
7. Гросу Ф.П., Болога М.К. Одномерные термоэлектрогидродинамические течения слабопроводящей жидкости // Сб. Магнитная гидродинамика. М., 1974. Вып. 1. С. 7–19.
8. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
9. Якушев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л.: Энергия, 1967. 299 с.

10. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. М.–Л.: Машгиз, 1957. 299 с.
11. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. М.–Л.: Гостехиздат, 1959. 283 с.
12. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с.

References

1. Galitsky B.M., Ryzhov Yu.A., Yakush E.V. Thermal and hydrodynamic processes in oscillating flows. Moscow: Mechanical Engineering, 1977. 256 p. (in Russ.).
2. Lukanin V.N., Shatrov M.G., Kamfer G.M., et al. (Eds.). Heat Engineering. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 671p. (in Russ.).
3. Roizen L. I., Dulkan I. N. Thermal Calculation of Finned Surfaces. Moscow: Energiya, 1977. 254 p. (in Russ.).
4. Stishkov Yu.A., Ostapenko A.A. Electrohydrodynamic Flows in Liquid Dielectrics. Leningrad: Leningradskiy universitet, 1989. 119 p. (in Russ.).
5. Ostroumov G.A. Interaction of Electric and Hydrodynamic Fields. Moscow: Nauka, 1979. 319 p. (in Russ.).
6. Grosu F.P., Bologa M.K. Electroconvective Phenomena and Heat Transfer Intensification // *Elektronnaya obrabotka materialov = Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 1977;5:51–62. (in Russ.).
7. Grosu F.P., Bologa M.K. One-Dimensional Thermoelectrohydrodynamic Flows of a Weakly Conducting Liquid // *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*. 1974;1:7–19. (in Russ.).
8. Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. Electroconvection and Heat Transfer. Kishinev: Shtiintsa, 1977. 320 p. (in Russ.).
9. Yakushev N.A. Theoretical Foundations of Non-Stationary Temperature Measurement. Leningrad: Energiya, 1967. 299 p. (in Russ.).
10. Kondratev G.M. Thermal Measurements. Moscow-Leningrad: Mashgiz, 1957. 299 p. (in Russ.).
11. Turichin A.M. Electrical Measurements of Non-Electrical Quantities. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, 1959. 283 p. (in Russ.).
12. Zaydel A.N. Errors in Measurements of Physical Quantities. Leningrad: Nauka, 1974. 108 p. (in Russ.).

ХИМИЯ

Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 49–56.
Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University. 2026;16(2):49–56.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64:542.952

Способы получения полиарилатов

Элла Арсеновна Бажева¹, Зера Лионовна Бесланеева², Рима Чамаловна Бажева³, Владислав Александрович Федоренко⁴

^{1,2,3,4}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹ellapistacho@yandex.ru

²zera-beslaneeva@mail.ru

³r.bazheva@mail.ru

⁴vf020888@gmail.com

Аннотация. Представлена обзорная информация по основным способам получения полиарилатов. Особое внимание уделено полиарилатам на основе бисфенола А и основным трендам развития химии полиарилатов.

Ключевые слова: полиарилат, поликонденсация, бисфенол А, межфазная поликонденсация, перестерификация

Для цитирования: Бажева Э.А., Бесланеева З.Л., Бажева Р.Ч., Федоренко В.А. Способы получения полиарилатов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 2. С. 49–56.

CHEMISTRY

Original article

Methods for producing polyarylates

Ella A. Bazheva¹, Zera L. Beslaneeva², Rima Ch. Bazheva³, Vladislav A. Fedorenko⁴

^{1,2,3,4}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹ellapistacho@yandex.ru

²zera-beslaneeva@mail.ru

³r.bazheva@mail.ru

⁴vf020888@gmail.com

Abstract. This article provides an overview of the main methods for producing polyarylates. Particular attention is paid to bisphenol A-based polyarylates and key trends in the development of polyarylate chemistry.

Keywords: polyarylate, polycondensation, bisphenol A, interfacial polycondensation, transesterification

For citation: Bazheva E.A., Beslaneeva Z.L., Bazheva R.Ch., Fedorenko V.A. Methods for producing polyarylates. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):49–56. (In Russ.).

Полиарилаты – это линейные сложные полиэфиры ароматических двухосновных кислот и ароматических дигидроксисоединений (дифенолов) общей формулы: $[-O-Ar-O-CO-Ar'-CO-]_n$. Благодаря жесткости ароматических цепей они обладают высокой термостойкостью, хорошими механическими и диэлектрическими свойствами [1–3]. По температурным характеристикам полиарилаты занимают промежуточное положение между полисульфонами (ПС) и поликарбонатами (ПК), а среди их свойств особого внимания заслуживают прочность, сопротивление ползучести, а также электрические свойства.

В обзоре Global Polyarylate Market Overview указано, что оптические пленки, автомобильные детали, электрические и электронные компоненты, а также промышленное оборудование являются ключевыми областями применения полиарилата. В частности, исключительные оптические свойства полиарилата делают его идеальным материалом для оптических пленок (optical films), используемых в различных областях применения, таких как поляризаторы, пленки для дисплеев и защитные пленки. По прогнозам, к 2025 году мировой рынок оптических пленок достигнет 12,3 млрд долларов, что обусловлено растущим спросом на высококачественные дисплеи для смартфонов, планшетов и других электронных устройств [4, 5].

Бытовая электроника остается доминирующей силой на рынке полиарилатов, прежде всего благодаря их важной роли в производстве современных электронных устройств, где высокая производительность имеет решающее значение. Легкий вес полиарилатов, а также их прочность и термостойкость обеспечивают повышенную долговечность и функциональность гаджетов [6].

В последние годы на рынке полиарилата появилось несколько новых разработок. В 2023 году компания SABIC выпустила новый сорт полиарилата, предназначенный для использования в автомобильной промышленности. Этот новый сорт обладает улучшенной текучестью и сокращенным временем цикла, что делает его идеальным материалом для использования в сложных автомобильных деталях. Кроме того, компания Solvay объявила о планах инвестировать 20 млн долларов США в свой завод по производству полиарилата во Франции. Эти инвестиции помогут увеличить производственные мощности компании и удовлетворить растущий спрос на полиарилат.

Исследования по полиарилатам ведутся с конца 1950-х годов. Наибольшее внимание привлекают полиарилаты на основе бисфенола А (БФА) и изофталевой или терефталевой кислот. Гомополимеры бисфенола А и изофталевой или терефталевой кислот являются полукристаллическими [1–3, 7–10]. Данные полимеры имеют температуры стеклования 183 и 206 °С, а также температуры плавления 270 и 370 °С соответственно. Эти полукристаллические полиарилаты не были коммерциализированы из-за слишком высоких температур плавления и крайне низкой скорости кристаллизации. Однако аморфные ПАР получают из смеси изофталевой и терефталевой кислот и БФА и могут легко переработаны в расплаве. Японская компания Unitika (1974), корпорация Union Carbide (ныне Solvay Advanced Polymers) (1978), компания Hooker Chemical (1979) и компания DuPont (1986) коммерциализировали эти полимеры под торговыми названиями U-polymer, Ardel, Durel и Arylon, соответственно.

Хотя термин «полиарилат» обычно относится к полиэфирам, содержащим полностью ароматические группы, более конкретно он обозначает полиэфир на основе бисфенола А и смеси терефталогидхлорида и изофталогидхлорида (50/50). Эти материалы были коммерциализированы впервые в 1970-х годах компаниями Hoechst-Celanese и Unitika.

В ряде стран выпускаются полиарилаты Д и ДВ серий, «U-polymers» компании «Unitica Ltd.» (Япония), гибридные полиэфиры марки «Daron 40» компании DSM (США), PAE-1 компании «Dynamite Noble».

На текущий момент (2026 год) массового крупнотоннажного производства ароматических полиарилатов (которые часто идут под торговыми марками AryLite, U-Polymer и др.) в России не существует в том объеме, в каком это делают зарубежные гиганты (Unitika, Solvay, DuPont).

Однако в России есть научно-производственные центры и опытные производства, которые занимаются синтезом и выпуском опытно-промышленных партий ароматических полиарилатов, в основном для нужд оборонной промышленности, микроэлектроники и специального приборостроения.

Один из старейших и ключевых центров компетенции в области полимеров в России – АО «Институт пластмасс» (г. Москва). Институт является разработчиком технологий и может производить опытные партии. Организация выполняет НИОКР, включая синтез лабораторных и опытно-промышленных партий, а также является правообладателями многих советских и российских рецептов. Исторически именно здесь разрабатывались многие марки полиарилатов (например, ПА-1, ПА-2, ПА-7, ДВ-105-Т, Арокс, Ариокс).

ОАО «Пластполимер» (в составе АО «Технодинамика») производит полимеры специального назначения. В номенклатуре предприятия значатся литьевые и пленочные марки полиарилатов. Это одно из немногих мест, где пытались сохранить производственные мощности по сложным поликонденсационным полимерам.

ООО «НПО Химсинтез» (г. Москва, производство в г. Переславль-Залесский) занимается импортозамещением и производством высокотехнологичных полимеров (в том числе теплостойких), а также полиарилатов марок «Арокс» (это торговая марка именно этого НПО). Они предлагают полиарилаты различных модификаций.

АО «Композит» (г. Королев) в основном занимается углеродными композитами и керамикой, но в структуре есть направления по полимерным связующим. Они используют полиарилаты для создания высокопрочных композитов, и у них есть участки по синтезу для внутренних нужд.

ФГУП «НИИПМ» (г. Пермь). Специализация: химия и технология переработки пластиков, но в кооперации с производителями сырья занимаются разработкой рецептов полимеров, включая полиарилаты для авиакосмической отрасли.

Основной мономер при получении полиарилатов – дифенилолпропан (бисфенол А) производят в ООО «Усольехимпром» (входит в ГК «Титан») и «Казаньоргсинтез».

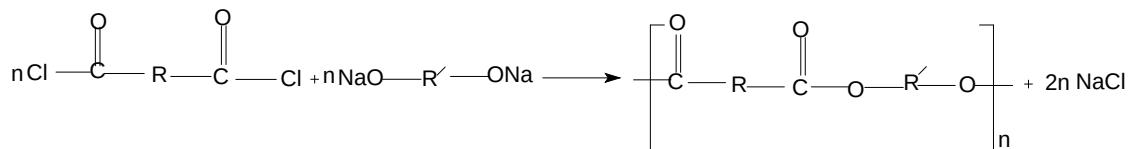
Но они выпускают бисфенол в основном для поликарбонатов. Для выпуска полиарилатов (где требования к чистоте могут быть выше) сырье необходимо дополнительно очищать, либо закупать импортное (китайское) через параллельный импорт.

Анализ мировой патентной литературы показал, что на начало 2025 года имеются более 100000 документов по полиарилатам. Среди патентообладателей лидерами ТОП-7 стали: Samsung Display Co., Ltd. – 7,4 %; Canon Kabushiki Kaisha – 3,9 %; Ricoh Company, Ltd. – 2,8 %; LG Chem – 2,1 %; General Electric Company – 2 %; Taylor Made Golf Company, Inc. – 1,7 %; Semiconductor Energy Laboratory Co., Ltd. – 1,5 %. Безусловное лидерство в основном за японскими, южнокорейскими и американскими компаниями [6].

В СССР разработка способа получения полиарилатов началась ещё в 1960-е годы. Крупнейшим основоположником этого направления был академик В.В. Коршак, работавший в Институте элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН. Анализ базы данных ФИПС показал, что по данной тематике имеется лишь около двух десятков патентов РФ на изобретения, причем статус поддержания в силе подтвержден только у некоторых из них [11–18].

Существует несколько основных способов получения полиарилатов:

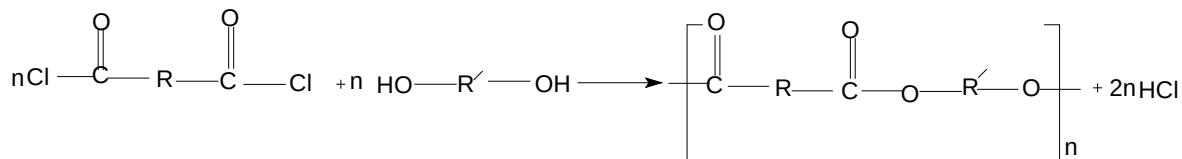
1. Самым распространенным и технологичным промышленным методом является *низкотемпературная (межфазная) поликонденсация* (гетерофазная):



Суть метода заключается в том, что реакция проходит на границе раздела двух несмешивающихся фаз – органической и водной. В качестве органической фазы используют хлорированные углеводороды, такие как 1,2-дихлорэтан, хлорбензол. Водная фаза представляет собой раствор дифенолята щелочного металла (например, бисфенола А, обработанного NaOH), органическая фаза – раствор хлорангидрида ароматической дикарбоновой кислоты (например: терефталойлхлорид, изофталойлхлорид). Процесс проводится при комнатной температуре. Реакция протекает на границе раздела фаз с очень высокой скоростью. Образующийся полимер сосредотачивается на межфазной поверхности, а затем переходит в органическую фазу. Побочный продукт – хлорид натрия (NaCl) – остается в водной фазе. Основные достоинства данного метода: не требуется строгой эквивалентности мономеров, позволяет получать полимеры

высокой молекулярной массы. Однако данный метод требует использования больших объемов органических растворителей и трудоемкости процессов очистки полимера от солей и остатков мономеров.

2. *Поликонденсация в растворе* (гомогенная, «приск-метод») используется, когда требуется получение полимеров специального состава или высокой чистоты.

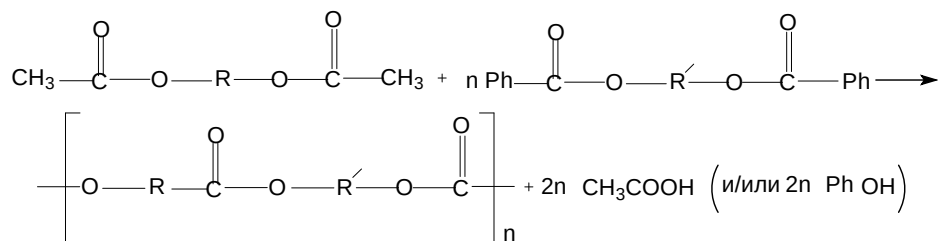


Суть метода заключается в том, что все компоненты реакции растворяются в одном инертном высококипящем растворителе. Бисфенол и дихлорангидрид кислоты растворяют в полярном апротонном растворителе (например, дихлорбензол, сульфолан, диметилсульфоксид). Реакция протекает в гомогенных условиях. Для связывания выделяющегося HCl и сдвига равновесия в сторону образования полимера в систему добавляют акцепторы HCl – третичные амины (пиридин, триэтиламин) или щелочные основания. Реакцию проводят при повышенных температурах (до 200–250 °C), что увеличивает молекулярную массу. В отличие от межфазной поликонденсации, образуется полимер более высокой степени чистоты, а также отмечается удаление побочных солей. Этот метод имеет ряд недостатков: он требует тщательной очистки растворителей и мономеров, сложнее обеспечить стехиометрическое соотношение, а его масштабирование менее эффективно.

3. *Поликонденсация в расплаве*. Классический метод для алифатических полиэфиров (как ПЭТФ), но ограниченно применим для полиарилатов. Поликонденсация проводится при высокой температуре в расплаве мономеров или образующегося полимера. Используются непосредственно ароматические дикарбоновые кислоты (а не их хлорангидриды или сложные эфиры) и бисфенолы. Основными недостатками (ограничениями) являются: температуры плавления полиарилатов очень высоки (часто выше температуры их разложения); ароматические кислоты и бисфенолы имеют низкую реакционную способность; выделяющаяся вода плохо удаляется из вязкого расплава.

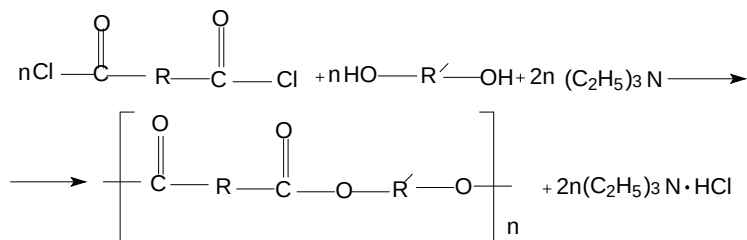
Данный метод используется для получения низкомолекулярных олигомеров или специальных типов полиарилатов с улучшенной плавкостью.

4. *Метод перэтерификации*.



Суть метода заключается во взаимодействии диацетатов бисфенолов (например, диацетат бисфенола А) с дифениловыми эфирами ароматических кислот. Реакция проводится при высокой температуре (250–300 °C) в вакууме для удаления летучих побочных продуктов (фенола и уксусной кислоты). Основное преимущество перэтерификации – более мягкие условия по сравнению с использованием хлорангидридов. Однако при высоких температурах существует риск побочных реакций, поэтому предварительный синтез сложных эфиров является необходимым условием минимизации нежелательных процессов.

4. *Низкотемпературная (акцепторно-каталитическая) поликонденсация*. Является удобным лабораторным способом, но не нашла широкого применения в промышленности.



В таблице 1 представлена сравнительная характеристика основных методов получения ПАР.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика основных методов получения ПАР

Метод	Мономеры (основные)	Условия	Преимущества	Недостатки	Применение
Межфазная	Дифенолят, хлорангидрид кислоты	Низкая Т, два раствора	Технологичность, высокая M_w , не нужна стехиометрия, мягкие условия	Агрессивные реагенты, высокий расход органических растворителей, критичность выбора растворителя, сложность очистки	Основной промышленный метод
Высокотемпературная в растворе	Дифенол, хлорангидрид кислоты	Повышенная Т, один растворитель	Чистый полимер, контроль за процессом, универсальность	Чистота реагентов, сложное масштабирование, сложность выделения и очистки полимера, низкая скорость реакции	Лабораторный синтез, специальные составы
В расплаве	Дифенол, дикарбоновая кислота	Высокая Т, вакуум	Простота аппаратуры	Применение ограничено, риск разложения, длительность процесса и диффузионные ограничения.	Специальные марки, олигомеры
Перезетрификация	Сложные эфиры мономеров	Высокая Т, вакуум	Без агрессивных реагентов	Многостадийность, высокие Т, термодеструкция	Альтернативный синтез

Таким образом, межфазная поликонденсация остается доминирующим промышленным способом получения полиарилатов благодаря своей простоте и эффективности. Поликонденсация в растворе – ключевой метод для исследований и получения полимеров с заданными свойствами в лаборатории. Остальные методы имеют узкоспециальное применение. Выбор метода зависит от требуемой марки полимера, доступного сырья и экономических факторов.

При усовершенствовании методов синтеза и переработки полиарилатов перспективными путями могут быть следующие направления:

1. Совершенствование методов поликонденсации и катализа.

Использование эффективных катализаторов, в частности, N-гетероциклические карбены, органические основания для минимизации побочных реакций и окрашивания. Нано- и гетерогенные катализаторы – функционализированные наночастицы, мезопористые материалы, иммобилизованные ферменты (липазы) для проведения реакций в мягких условиях и легкого отделения катализатора;

новые технологические приемы: поликонденсация с удалением побочного продукта под вакуумом или азеотропной отгонкой для смещения равновесия и получения высокомолекулярных продуктов;

использование ионных жидкостей как среды для синтеза (растворитель и часто катализатор одновременно), что позволяет работать при более низких температурах;

проведение заключительных стадий синтеза предполимера (форполимера) в твердой фазе при температурах ниже температуры плавления. Это позволит получать полимеры с более высокой молекулярной массой и улучшенными свойствами без термической дегградации;

2. Оптимизация технологий переработки:

Химическая деполимеризация (вторичная переработка): разработка методов гидролиза полиарилатов обратно в мономеры или ценные химикаты в контролируемых условиях (катализаторы, сверхкритические жидкости);

получение композитов и смесей: синтез полиарилатов, совместимых с другими полимерами (поликарбонатом, полисульфоном) или наполнителями (нанотрубки, графен), для создания материалов с заданными комплексными свойствами.

Соответственно, в ближайшем будущем мировой рынок полиарилатов продемонстрирует значительный рост, так как спрос на полиарилаты растет. Применение собственных материалов и развитие отечественной базы синтеза сложных полимеров может значительно сократить расходы на организацию новых производств. Рынок специальных полимеров в России очень динамичен: предприятия могут закрывать «спящие» производства под госзаказ или, наоборот, сворачивать их из-за нерентабельности.

Современный синтез полиарилатов движется от опасных процессов к «зеленой» и безопасной химии, от стандартных материалов к высокофункциональным полимерам с заданным комплексом свойств (термо-, химстойкость, прозрачность, перерабатываемость). Основные драйверы – это запросы микроэлектроники, аэрокосмической отрасли, биомедицины и устойчивого развития. Учитывая большое количество доступных диоксисоединений и ароматических дикарбоновых кислот возможно создание множества полиарилатов и композиций с необычными свойствами.

Библиография

1. Виноградова С.В., Васнев В.А., Валецкий П.М. Полиарилаты. Получение и свойства. // Успехи химии. 1994. Т. 63, № 10. С. 885–904.
2. Родивилова Л.А. Полиарилаты – новые термостойкие полимеры // Пластические массы. Сборник трудов НИИ пластических масс. М.: Химия. 1970. С. 91–100.
3. Виноградова С.В., Васнев В.А., Выгодский Я.С. Кардовые полигетероарилены. Синтез, свойства и своеобразие // Успехи химии. – 1996. Т. 65, № 3. С. 266–295.
4. Polyarylate. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyarylate> (дата обращения 11.03.2026).
5. Polyarylate Market Analysis 2026 <https://www.cognitivemarketresearch.com/polyarylate-market-report>. (дата обращения 11.03.2026).
6. Полиарилат для электроники и не только: краткий патентный анализ. <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/890288/> (дата обращения 11.03.2026).
7. Хараев А.М., Бажева Р.Ч., Чайка А.А. Термо- и огнестойкие полиэферы конструкционного и пленочного назначения. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 138 с.
8. Bazheva R.C., Charaev A.M., Borodulin A.S., Kalinnikov A.N. Polymer composites based on halogen-containing oligoethers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 1, Advances in Composite Science and Technologies. Moscow, 2019. P. 012051.
9. Буря А.И., Чигвинцева О.П., Сучилина-Соколенко С.П. Полиарилаты. Синтез, свойства, композиционные материалы. Днепрпетровск: Наука и освіта, 2001. 152 с.
10. Виноградова С.В., Васнев В.А., Коршак В.В., Васильев А.В., Дубровина Л.В. Некоторые закономерности синтеза полиарилатов дихлордиана в присутствии триэтиламина // Высокомол. соедин. А. 1971. Т. 13, № 4. С. 770–774.
11. Патент РФ № 2851590 С1, МПК С08L 71/00, С08J 5/22, В01D 67/00. Полимерный протонпроводящий композит и способ его получения / А.А. Беев, С.Ю. Хаширова, Д.А. Беева; заявитель ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова». Опубл. 25.11.2025 г. Бюлл. № 33.
12. Патент РФ № 2556858 С2, МПК С08G 63/18, С08G 63/183, С08G 63/193. Способ получения полиарилатов / В.Е. Рыбин, Ю.Ф. Шумский, А.А. Меркин; ФКП «Завод имени Я.М. Свердлова». Опубл. 20.07.2015 г. Бюлл. № 20.
13. Патент РФ № 2671859 С1, МПК С08L 67/03, С08L 71/08. Тепло- и термостойкая полимерная композиция трибологического назначения / А.П. Краснов, А.Е. Сорокин, М.В. Горошков, Е.А. Шапошникова, С.Н. Салазкин, А.В. Наумкин; заявитель ФГБУН Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова (ИНЭОС РАН). Опубл. 07.11.2018 г. Бюлл. № 31.
14. Патент РФ № 2834962 С1, МПК С08G 63/183, С08G 63/78, С08G 63/81. Способ получения полиарилата / И.П. Сторожук, Д.П. Булкатов, В.С. Буряков, А.Н. Калинин, М.А. Орлов, С.В. Гришин;

заявитель ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». Оpubл. 19.02.2025 г. Бюлл. № 5.

15. Патент РФ № 2830631 C1, МПК C08G 63/688, C08G 65/40, C08G 75/20. Способ получения полиарилат-полисульфоновых блок-сополимеров / И.П. Сторожук, Д.П. Булкатов, В.С. Буряков, А.Н. Калинин, М.А. Орлов, С.В. Гришин; заявитель ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана». Оpubл. 25.11.2024 г. Бюлл. № 33.

16. Патент РФ № 2834355 C1, МПК C04B 38/10, C04B 28/04, C04B 111/20. Сырьевая смесь для изготовления бетона / С.С. Мельников, С.А. Гнездилов, Ю.А. Троицкий, А.В. Троицкий, А.В. Куртов, А.И. Гальцев; заявитель Акционерное Общество «БетЭлТранс». Оpubл. 06.02.2025 г. Бюлл. № 4.

17. Патент РФ № 2293092 C1, МПК C08J 5/16, C09D 177/00, C10M 161/00. Композиционный триботехнический материал / В.Г. Мельников, В.В. Терентьев; заявитель: ГОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет» (ИГХТУ). Оpubл. 10.02.2007 г. Бюлл. № 4.

18. Патент РФ № 2565177 C1, МПК C08L 3/10. Эпоксидное связующее пленочного типа / Е.Н. Каблов, Л.В. Чурсова, А.Н. Бабин, Д.И. Коган, Н.Н. Панина, Я.М. Гуревич; ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»). Оpubл. 20.10.2015 г. Бюлл. № 29.

References

1. Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Valetsky P.M. Polyarylate. Preparation and Properties // *Uspekhi khimii = Advances in Chemistry*. 1994;63(10): 885–904. (in Russ.).
2. Rodivilova L.A. Polyarylates – New Heat-Resistant Polymers // *Plastic Masses. Collection of Papers of the Research Institute of Plastic Masses*. Moscow.: Khimiya. 1970. Pp. 91–100. (in Russ.).
3. Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Vygodsky Ya.S. Cardan Polyheteroarenes. Synthesis, Properties, and Peculiarities // *Uspekhi khimii = Advances in Chemistry*. 1996;65(3):266–295. (in Russ.).
4. Polyarylate. URL <https://sciedirect.com/topics/engineering/polyarylate/2026/03/11-t-isds-in-the-ttip.pdf>.
5. Polyarylate Market Analysis 2026 URL <https://www.cognitivemarketresearch.com/polyarylate-fiber-market-report/2026/03/11-t-isds-in-the-ttip.pdf>.
6. Polyarylates for Electronics and Beyond: A Brief Patent Analysis. URL <https://habr.com/ru/companies/onlinepatent/articles/890288/2026/03/11-t-isds-in-the-ttip.pdf>.
7. Kharayev A.M., Bazheva R.Ch., Chaika A.A. Thermal and fire-resistant polyethers for structural and film applications. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 138 p. (in Russ.).
8. Bazheva R.C., Charaev A.M., Borodulin A.S., Kalinnikov A.N. Polymer composites based on halogen-containing oligoethers // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 1, Advances in Composite Science and Technologies*. Moscow, 2019. P. 012051.
9. Burya A.I., Chigvintseva O.P., Suchilina-Sokolenko S.P. Polyarylates. Synthesis, Properties, and Composite Materials. Dnepropetrovsk: Nauka i Osvita, 2001. 152 p. (in Russ.).
10. Vinogradova S.V., Vasnev V.A., Korshak V.V., Vasilyev A.V., Dubrovina L.V. Some regularities of the synthesis of polyarylates of dichlorodiane in the presence of triethylamine // *Vysokomolekulyarnye soedineniya A = Polymer Science, Series A*. 1971;13(4):770–774. (in Russ.).
11. Patent № 2851590 C1, Russian Federation, IPC C08L 71/00, C08J 5/22, B01D 67/00. Polymeric proton-conducting composite and method for its production / A.A. Beev, S.Yu. Khashirova, D.A. Beeva; applicant Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov. Published on 25.11.2025. Bull. no. 33.
12. Patent of the Russian Federation № 2556858 C2, IPC C08G 63/18, C08G 63/183, C08G 63/193. Method for producing polyarylates / V.E. Rybin, Yu.F. Shumsky, A.A. Merkin; FKP "Zavod imeni Ya.M. Sverdlova". Published on July 20, 2015. Bull. no. 20.
13. Patent № 2671859 C1, Russian Federation, IPC C08L 67/03, C08L 71/08. Heat- and thermostable polymer composition for tribological purposes / A.P. Krasnov, A.E. Sorokin, M.V. Goroshkov, E.A. Shaposhnikova, S.N. Salazkin, and A.V. Naumkin; applicant: A.N. Nesmeyanov Institute of Organometallic Compounds of the Russian Academy of Sciences (INEOS RAS). Published on 07.11.2018. Bull. no. 31.
14. Patent № 2834962 C1, Russian Federation, IPC C08G 63/183, C08G 63/78, C08G 63/81. Method for producing polyarylate / I.P. Storozhuk, D.P. Bulkatov, V.S. Buryakov, A.N. Kalinnikov, M.A. Orlov, and S.V. Grishin; applicant: Bauman Moscow State Technical University. Published on 19.02.2025. Bull. no. 5.

15. Patent № 2830631 C1, Russian Federation, IPC C08G 63/688, C08G 65/40, C08G 75/20. Method for producing polyarylate-polysulfone block copolymers: № 2024109103 / I.P. Storozhuk, D.P. Bulkatov, V.S. Buryakov, A.N. Kalinnikov, M.A. Orlov, and S.V. Grishin; applicant: Bauman Moscow State Technical University. Published on 25.11.2024. Bull. no. 33.

16. Patent № 2834355 C1, Russian Federation, IPC C04B 38/10, C04B 28/04, C04B 111/20. Raw material mixture for concrete production / S.S. Melnikov, S.A. Gnezdilov, Yu.A. Troitsky, A.V. Troitsky, A.V. Kurtov, and A.I. Galtsev; applicant: BetElTrans Joint Stock Company. Published on 06.02.2025. Bull. no. 4.

17. Patent № 2293092 C1, Russian Federation, IPC C08J 5/16, C09D 177/00, C10M 161/00. Composite Tribotechnical Material / V.G. Melnikov, V.V. Terentyev; Applicant: Ivanovo State University of Chemistry and Technology (ISUCT). Publ. 10.02.2007. Bull. no. 4.

18. Patent № 2565177 C1 Russian Federation, IPC C08L 3/10. Epoxy binder of film type / E.N. Kablov, L.V. Chursova, A.N. Babin, D.I. Kogan, N.N. Panina, Ya.M. Gurevich; FSUE "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials" (FSUE "VIAM"). Published on 20.10.2015. Bull. no. 29.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 547.717

Химическая стойкость хлорсодержащих эпоксидных полимеров

Сафият Масхутовна Балаева¹, Геннадий Борисович Шустов², Константин Борисович Темираев³, Джульетта Анатольевна Беева⁴, Руслан Адиевич Шетов⁵

^{1,2,4,5}Кабардино-Балкарский Государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

³Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), Республика Северная Осетия-Алания, Владикавказ, Россия

¹safiyat.balaeva@mail.ru

²alla_7583@mail.ru

³temiraevkonstantin@yandex.ru

⁴d.beeva@mail.ru

⁵rus.shetov@mail.ru

Аннотация. В статье представлены сведения о химической устойчивости в различных средах эпоксидных полимеров, содержащих гексахлорэтан и отвержденных разными отвердителями. Получены эпоксидные полимеры с хорошей химической стойкостью.

Ключевые слова: хлорсодержащие эпоксидные полимеры, химическая устойчивость

Для цитирования: Балаева С.М., Шустов Г.Б., Темираев К.Б., Беева Дж.А., Шетов Р.А. Химическая стойкость хлорсодержащих эпоксидных полимеров // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 57–62.

CHEMISTRY

Original article

Chemical stability of chlorine-containing epoxy polymers

Safiyat M. Balaeva¹, Gennady B. Shustov², Konstantin B. Temiraev³, Dzhulett A. Beeva⁴, Ruslan A. Shetov⁵

^{1,2,4,5} Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

³North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

¹safiyat.balaeva@mail.ru

²alla_7583@mail.ru

³temiraevkonstantin@yandex.ru

⁴d.beeva@mail.ru

⁵rus.shetov@mail.ru

Abstract. The article presents information on the chemical stability of epoxy polymers containing hexachloroethane in various environments, which are cured with different hardeners. Epoxy polymers with good chemical resistance have been obtained.

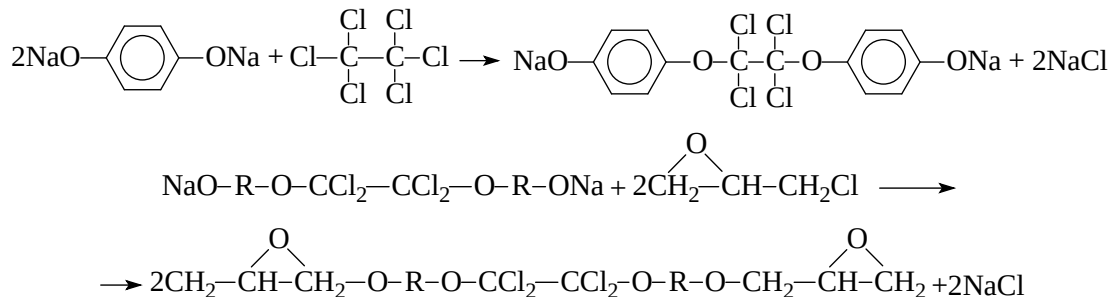
Keywords: chlorine-containing epoxy polymers, chemical resistance

For citation: Balaeva S.M., Shustov G.B., Temiraev K.B., Beeva D.A., Shetov R.A. Chemical stability of chlorine-containing epoxy polymers. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026; 16(2):57–62. (In Russ.).

В связи с расширением области применения и увеличения объемов применения эпоксидных полимеров в промышленности принципиальное значение приобретает задача уточнения пределов их работоспособности в агрессивных средах.

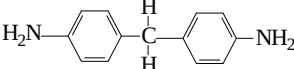
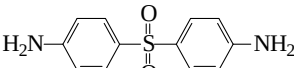
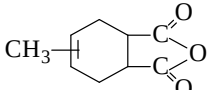
Свойства эпоксидных полимеров и их химическая стойкость определяются строением и структурой молекул [1]. Химическую стойкость полимеров можно повысить уменьшением концентрации доступных нестойких связей, путем повышения степени сшивки, введением в молекулу химически стойких связей и уменьшением дефектности структуры путем соблюдения разных режимов отверждения.

Синтезированные нами эпоксидные олигомеры на основе 2,2-ди(4-оксифенил)сульфона (ДОДФС), резорцина (РЗЦ) и гексахлорэтана (ГХЭ) были получены по реакции:



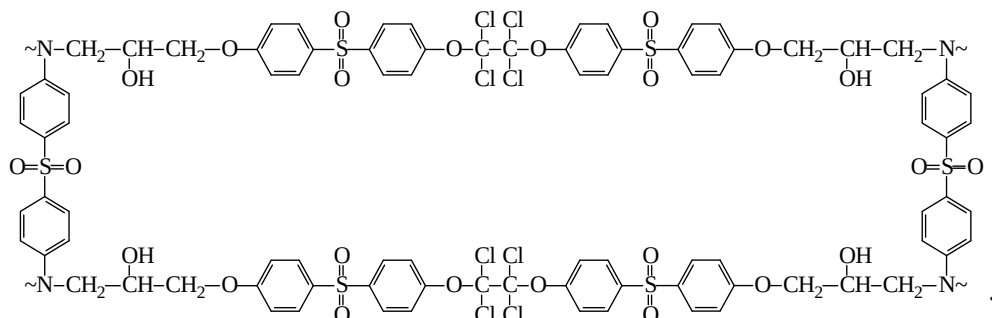
Полимеры получали путем отверждения эпоксидных смол диаминами и ангидридами фталевых кислот, строение которых приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Соединения, используемые в качестве отвердителей

Название	Структурная формула	Сокращенное обозначение
Диаминодифенилметан		ДАДФМ (на диаграммах – 1)
Диэтилентриамин	$\text{H}_2\text{N}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{NH}-\text{C}_2\text{H}_4-\text{NH}_2$	ДЭТА (на диаграммах – 2)
Диаминодифенилсульфон		ДАДФС (на диаграммах – 3)
Изо-метилтетрагидро-фталевый ангидрид		ИМТГФА (на диаграммах – 4)

Экспериментально установлено, что оптимальная температура для отверждения хлорсодержащего олигомера – 393 К, а требуемое время отверждения – 4 часа.

В качестве примера строения эпоксидного полимера можно представить фрагмент структуры на основе 2ДОДФС + ГХЭ, где отвердителем является диаминодифенилсульфон (ДАДФС):



Для выяснения химической стойкости эпоксидных полимеров проведены испытания полученных хлорсодержащих полимеров в 1 %-ной и 30 %-ой NaOH, 3 %-ной и концентрированной HCl (36,5 %), 3 %-ной и концентрированной H2SO4 и 10 %-ной NaCl.

Результаты исследования показали, что полученные хлорсодержащие эпоксидные полимеры обладают достаточно высокой химической устойчивостью к различным средам (рисунки 1).

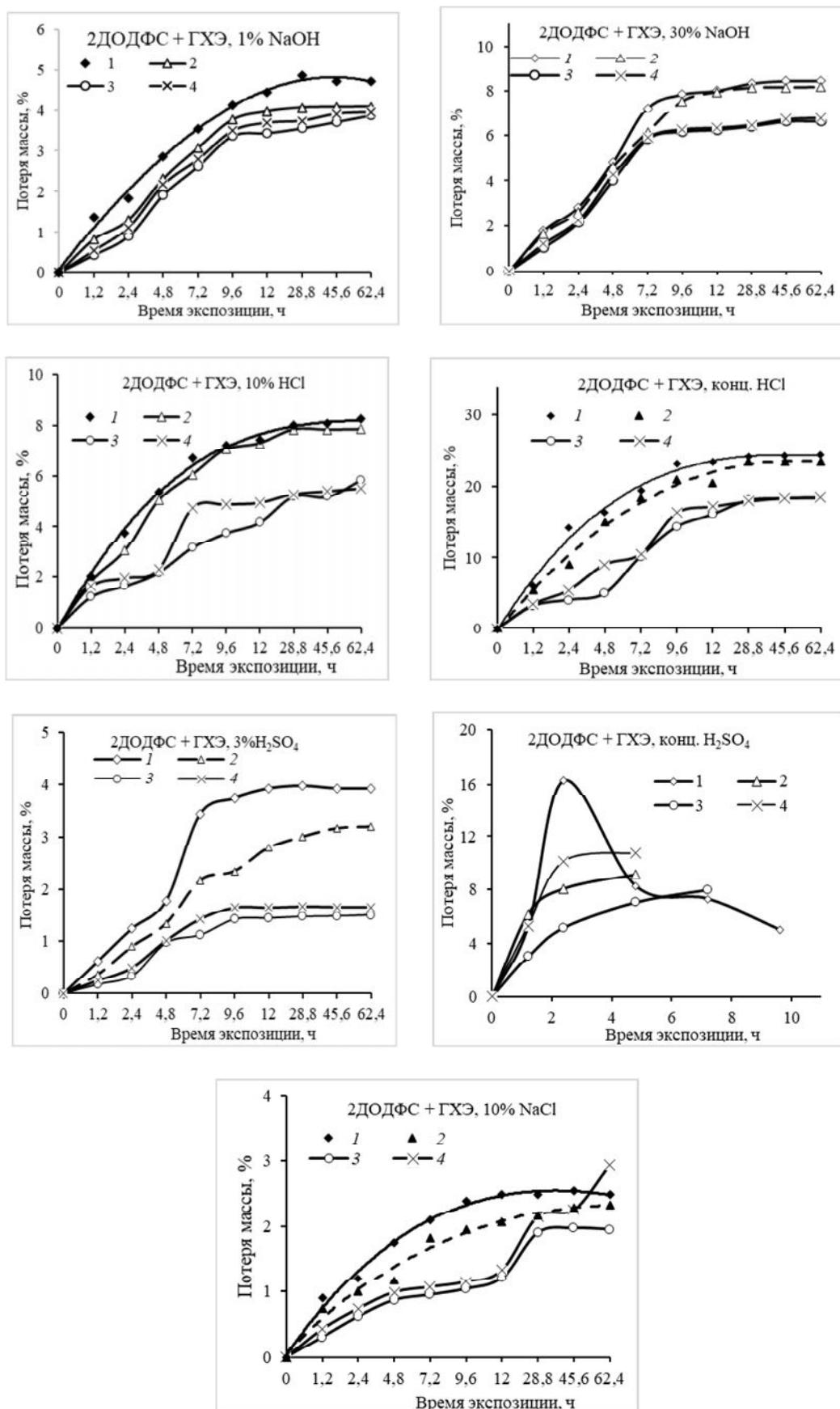


Рисунок 1 – Временная зависимость потери массы 2ДОДФС+ГХЭ в различных агрессивных средах. Отвердители: 1 – ДАДФМ; 2 – ДЭТА; 3 – ДАДФС; 4 – ИМТГФА

Общая закономерность для зависимостей потери массы от времени образцов полимера на основе 2ДОДФС + ГХЭ (рисунок 1) заключается в том, что после начального роста ее величины стабилизируются, и диаграммы выходят на «плато». В случае NaOH – через 12 (1 %) и ~ 8 (30 %) часов, HCl – 28 (10 %) и 10 (конц.) часов, 10 % NaCl – через 10–12 часов.

Отметим, что различие в химической стойкости образцов 2ДОДФС + ГХЭ, выражающееся в ее зависимости от использованного отвердителя, существенно во всех случаях и для всех агрессивных сред. В случае растворов NaOH оно достигает 25–50 %, HCl и NaCl – разброс почти 100 %, для 10 % NaCl – 30–35 %. Во всех указанных случаях самая высокая химическая стойкость наблюдалась у образцов полимеров, синтезированных с использованием в качестве отвердителя диаминодифенилсульфона, далее по химстойкости полимеры с использованием в качестве отвердителя изо-метилтетрагидрофта-левого ангидрида, затем диэтилентриамина и диаминодифенилметана. Что касается влияния концентрации растворов, то повышение концентрации NaOH с 1 до 30 % приводит к ухудшению химической стойкости полимера в 2 раза, в случае с HCl (10 и 36 % соответственно) – в 3–4 раза.

Влияние H_2SO_4 (ее 3 %-ного раствора) оказалось по агрессивности такого же порядка, как NaOH, HCl и NaCl при схожем характере концентрационной зависимости и таком же оптимальном варианте выбора отвердителя – ДАДФС. Этот полимер оказался самым устойчивым и к воздействию концентрированной серной кислоты: его образец выдержал 8 часов экспозиции. Другие три варианта полимера разрушились раньше – через 5 часов (варианты с ДЭТА и ИМТГФА), а полимер 2ДОДФС+ГХЭ с отвердителем ДАДФМ быстро терял массу (2,5 часа), сопровождался набуханием, дальнейшей потерей массы и деструкцией.

Ниже приведена химическая стойкость полимеров на основе РЗЦ + ГХЭ (рисунок 2)

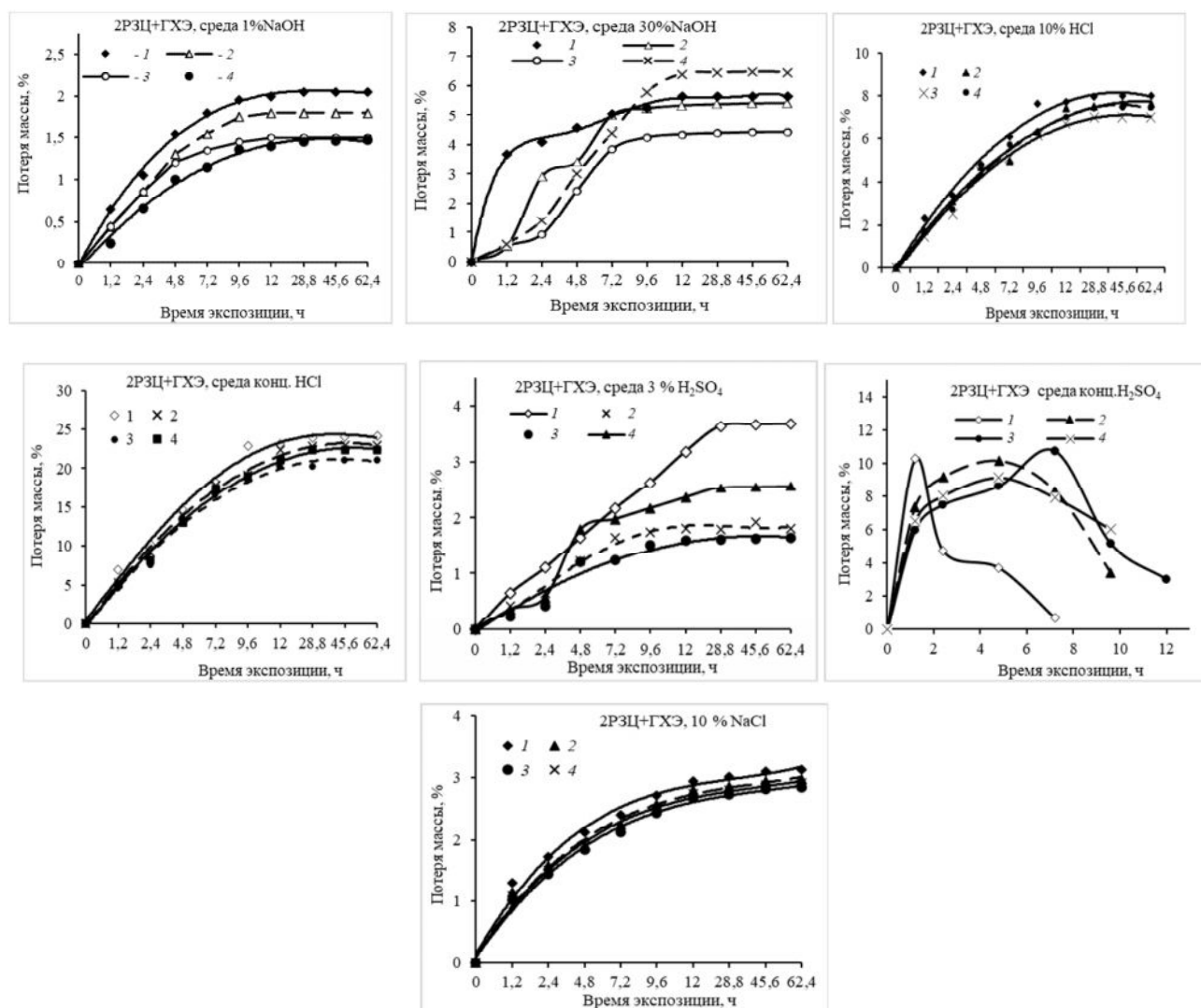


Рисунок 2 – Временная зависимость потери массы 2РЗЦ+ГХЭ в различных агрессивных средах. Отвердитель: 1 – ДАДФМ; 2 – ДЭТА; 3 – ДАДФС; 4 – ИМТГФА

Как видно из сравнения диаграмм *рисунка 2*, у полимера 2РЗЦ+ГХЭ максимальную устойчивость к воздействию 1 %-ного раствора NaOH обнаруживает состав с отвердителем ИМТГФА, в среде 30 %-ного раствора NaOH – ДАДФС. Значения выхода на «плато» – 1,5 и 4,5 % потери массы, ~ 8–10 часов экспозиции соответственно. Для сравнения, в случае 2ДОДФС + ГХЭ (см. *рисунок 1*) соответствующие цифры – 3,5 и 6,5 % при тех же значениях времени экспозиции.

Во всех остальных случаях оптимальным вариантом является полимер 2РЗЦ+ГХЭ с отвердителем ДАДФС. Химическая стойкость такого полимера по отношению к 10 %-ному и концентрированному растворам HCl, 3 %-ному раствору H₂SO₄ у обоих полимеров сравнима. Особенность поведения полимеров с 2РЗЦ+ГХЭ указанными отвердителями в 10 %-ном растворе NaCl состоит в том, различия практически нет. Оптимальный вариант состава 2ДОДФС+ГХЭ по *рисунку 1* в 1,5 раза более эффективен, чем 2РЗЦ+ГХЭ с отвердителем ДАДФС (*рисунок 2*).

Таким образом, приведенные выше наблюдения (*рисунок 1*) имеют место и в случае с эпоксидными полимерами на основе РЗЦ + ГХЭ, а сравнение диаграмм показывает, что в большинстве случаев по сравнению с эпоксидными полимерами на основе ДОДФС + ГХЭ полимеры на основе РЗЦ + ГХЭ менее устойчивы во всех средах (см. *рисунок 2*), что можно объяснить менее жесткой структурой полимеров на основе резорцина.

Самая низкая устойчивость полимеров проявляется по отношению к концентрированной серной кислоте. Падение массы образцов, связанное с деструктивными процессами, начинается через 1–1,5 часа, и лишь в случае эпоксидного полимера на основе диоксифенилсульфона и гексахлорэтана (отвердитель диаминодифенилсульфон) потеря массы начинается через 2 ч., что, по-видимому, связано с более высокой химической стойкостью сульфоновых групп. Как видно из *рисунков 1 и 2*, на кривой зависимости потери массы от времени экспозиции в концентрированной серной кислоте имеется максимум, а за адсорбционным процессом следует уменьшение относительной массы образца за счет набухания и деструкция.

Хорошей устойчивостью эпоксидные полимеры обладают в растворах хлорида натрия (*рисунки 1 и 2*). Это важно, поскольку прямо подтверждает эффективность использования эпоксидных полимеров в качестве герметиков для различных видов аппаратуры в консервной промышленности с учетом сохранения ее эксплуатационных характеристик.

В отличие от концентрированной серной кислоты, существенной разницы во влиянии ее разбавленных растворов на химическую стойкость хлорсодержащих эпоксидных полимеров не обнаружено.

Полученные полимеры больше всего теряют массу в концентрированной соляной кислоте (*рисунки 1 и 2*). Соляная кислота относится к электролитам с высоким давлением пара, она проникает в полимер с коэффициентом диффузии, близким к коэффициенту диффузии воды. Повышенное содержание эпоксидных групп приводит к увеличению количества сшивок в единице объема полимера, логическим следствием этого является повышение химической устойчивости. Доказательством этому могут служить приведенные на *рисунке 3* данные ТГА образца полимера до и после экспозиции в растворе 3 %-ной серной кислоты. Для снятия ТГА-кривых образец после экспозиции в растворе вакуумировался до постоянной массы.

Из *рисунка 3* можно заметить, что данные ТГА отличаются незначительно. Это может являться доказательством того, что изменения в полимере в данном случае связаны с адсорбционными процессами.

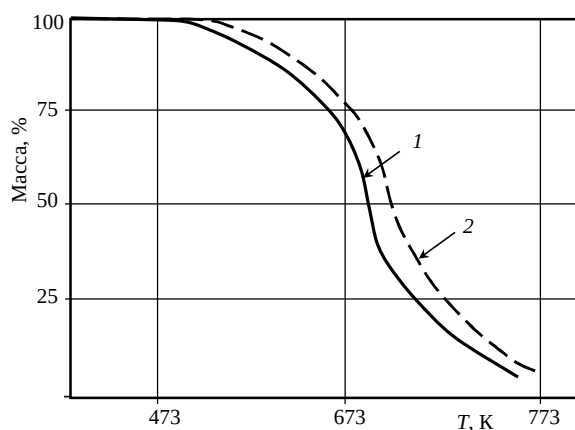


Рисунок 3 – Результаты ТГА эпоксидных полимеров на основе 2РЗЦ + ГХЭ (отвердитель ДАДФС: после экспозиции в 3 % H₂SO₄ в течение 6,2 часа (1) и до экспозиции (2)

Известно, что величина сорбции молекул агрессивной среды полимерами зависит от степени сшивки последних. Как уже указано выше, повышенное содержание эпоксидных групп приводит к увеличению количества сшивок в единице объема полимера, логическим следствием которого является повышение химической стойкости (рисунки 1 и 2).

Резюмируя, можно отметить, что химическая стойкость галогенсодержащих эпоксидных полимеров в зависимости от отвердителя повышается в ряду диэтилентриамин < диаминодифенилметан < изометилтетрагидрофталевого ангидрида < диаминодифенилсульфон.

Вероятно, более высокая химическая стойкость полимеров при применении ДАДФС и изометилтетрагидрофталевого ангидрида связана со стабильностью SO₂-групп, а также эфирных связей, образующихся при отверждении ангидридом.

Нами была исследована также устойчивость хлорсодержащих эпоксидных полимеров к различным маслам: растительному, дизельному, смазочному. Для этого подготовленные образцы погружались в эти масла и выдерживались в течение 48 ч. В результате эксперимента установлено, что указанные выше масла практически не оказывают влияния на хлорсодержащие эпоксидные смолы, так как не наблюдались изменения ни в массе, ни цвете образцов.

Таким образом, полученные хлорсодержащие эпоксидные полимеры обладают высокой химической стойкостью к разбавленным и концентрированным растворам щелочей и кислот, а также к некоторым маслам и солям, что позволяет рекомендовать их использование в качестве химически стойких пропиточно-заливочных компаундов в электротехнике и электронике.

Библиография

1. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и нанокompозиты. Черноголовка: «Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН», 2021. 319 с.
2. Калинина Н.К., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Способы повышения химической стойкости композиционных материалов на основе эпоксидных олигомеров // Успехи в химии и химической технологии. 2007. Т. 21, № 5 (73) С. 60–64.
3. Гарипов Р.М., Квасов С.А., Софьина С.Ю., Кириллов А.Н. Влияние активных модификаторов на процесс отверждения эпоксиаминных композиций // Международная конференция студентов и аспирантов "Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений": Тез. докл. Казань, 2001. С. 40.

References

1. Irzhak V.I. Epoxy Polymers and Nanocomposites. Chernogolovka: Editorial and Publishing Department of the Institute of Physical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 2021. 319 p. (In Russ.).
2. Kalinina N.K., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Methods of Increasing the Chemical Resistance of Composite Materials Based on Epoxy Polymers. *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi tekhnologii = Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2007;21(5):60–64. (In Russ.).
3. Garipov P.M., Kvasov S.A., Sofina S.Yu., Kirillov A.N. The Influence of Active Modifiers on the Curing Process of Epoxyamine Compositions // International Conference of Students and Postgraduate Students "Synthesis, Properties Research, Modification, and Processing of High-Molecular-Weight Compounds": Abstracts. Kazan, 2001. P. 40. (In Russ.).

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.6

N,N-диаллилакриламид и полимеры на его основе

Алим Владимирович Бляшев¹, Мадина Биляловна Бегиева²

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹ablyashev@internet.ru

²madibeg@mail.ru

Аннотация. Обсуждены условия синтеза нового мономера – N,N-диаллилакриламида. Реакцией радикальной полимеризации получен новый полимер полилактат N,N-диаллилакриламид. Структура полученных продуктов аллильной природы подтверждена элементным анализом, ИК- и ЯМР-спектроскопией.

Ключевые слова: радикальная полимеризация, полимер, мономер, мономер N,N-диаллилакриламид, поли-N,N-диаллилакриламид, лактат-N,N-диаллилакриламид, поли-лактат N,N-диаллилакриламид

Для цитирования: Бляшев А.В., Бегиева М.Б. N,N-диаллилакриламид и полимеры на его основе // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 2. С. 63–72.

CHEMISTRY

Original article

N,N-diallylacrilamid and polymers based on it

Alim V. Blyashev¹, Madina B. Begieva²

^{1,2}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹ablyashev@internet.ru

²madibeg@mail.ru

Abstract. The conditions for the synthesis of a new monomer, N,N-diallylacrylamide, are discussed. A new polymer, polylactate N,N-diallylacrylamide, was obtained by radical polymerization. The structure of the obtained products of allyl nature was confirmed by elemental analysis, IR and NMR spectroscopy.

Keywords: radical polymerization, polymer, monomer, N,N-diallylacrylamide monomer, poly- N,N-diallylacrylamide, lactate- N,N-diallylacrylamide monomer, poly- lactate- N,N-diallylacrylamide

For citation: Blyashev A.V., Begieva M.B N,N-diallylacrilamid and polymers based on it *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):63–72. (In Russ.).

Исследованию реакции радикальной полимеризации мономеров диаллильной природы посвящен целый ряд работ [1–5]. Это обусловлено особенностью полимеризационных процессов диаллильных мономеров, в частности, циклолинейным механизмом роста цепи при полимеризации.

Впервые образование полимеров с циклолинейной структурой на основе мономеров диаллильной природы было показано Батлером и его сотрудниками. Механизм циклополимеризации Батлер объяснял наличием в цепи актов внутри- и межмолекулярного присоединения, обусловленных электронным взаимодействием между двумя двойными связями в молекуле диаллиламина [6–10]. Циклополимеризацию диаллиламинов он представил в схеме 1:

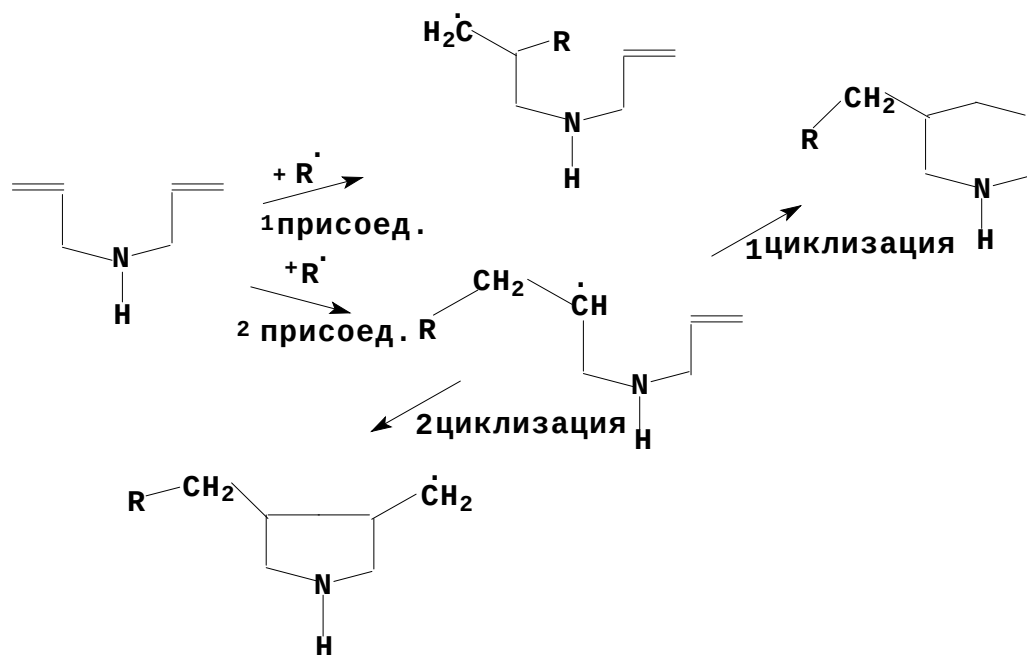
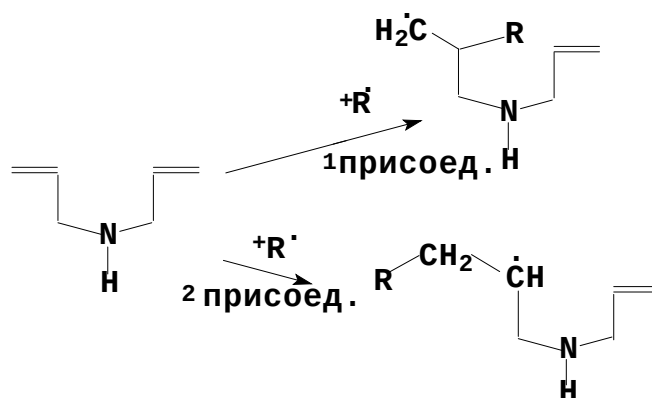


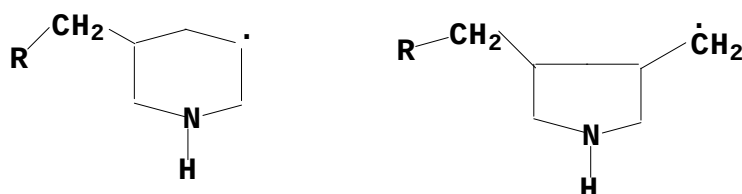
Схема 1

Впоследствии механизм циклополимеризации мономеров диаллильной природы изучался целым рядом авторов [11–15]. В настоящее время можно считать установленным, что рост цепи при циклополимеризации состоит из трех последовательных стадий:

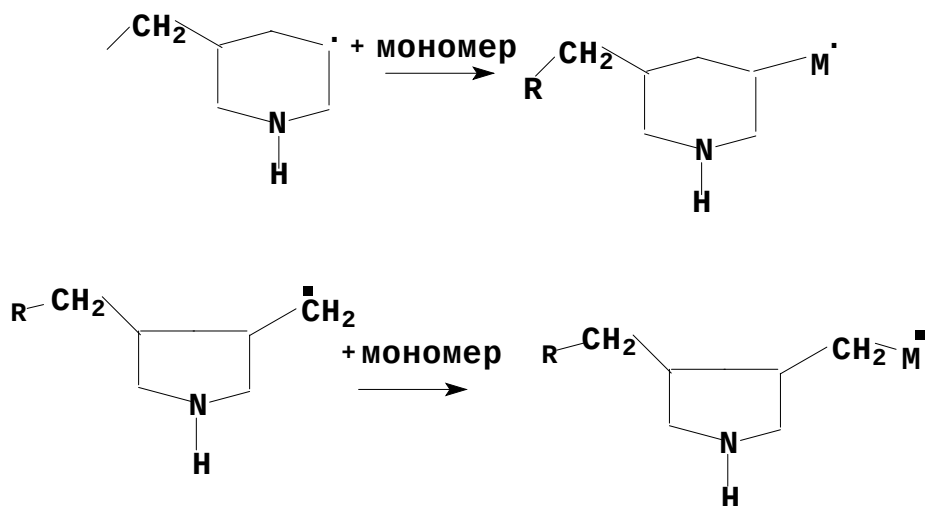
1) межмолекулярное взаимодействие – присоединение радикала к первой двойной связи в молекуле мономера с образованием внутреннего радикала:



2) реакция внутримолекулярного роста – циклизация:



3) рост цепи – присоединение молекулы мономера к циклическому радикалу (межмолекулярное взаимодействие).



В работах [16–26] было показано, что скорость полимеризации диаллиламина и его производных заметно повышается в комплексообразующих и кислых средах, превращаясь в соответствующих растворах в кватернизованную форму. При этом деградиционная передача цепи на мономер частично трансформируется в эффективную передачу.

В настоящее время исследователи уделяют повышенное внимание синтезу *N*-замещенного акриламида диаллильной природы, несмотря на то, что акриламид (АА) является токсичным веществом [27–32].

Полимеры, получаемые на основе *N*-замещенного акриламида, не обладают токсичными свойствами. Полиакриламид относится к числу доступных и сравнительно недорогих водорастворимых полимеров неионогенного характера с уникальным комплексом прикладных свойств. Главным недостатком водных растворов полиакриламида является низкая солестойкость [27].

В связи с этим синтез новых мономеров и полимеров диаллильной природы на основе *N*-замещенного акриламида с регулируемым гидрофобно-гидрофильным балансом является весьма актуальной проблемой.

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований особенностей процессов получения высокомолекулярных водорастворимых полимеров с регулируемым кислотно-основным и гидрофильно-гидрофобным балансом на основе *N*-замещенного акриламида диаллильной природы.

Экспериментальная часть

В экспериментах использовали реагенты отечественного производства квалификации х.ч.

Исходные вещества

Получение *N,N*-диаллилакриламида

N,N-диаллилакриламид (ДАА) получали алкилированием акриламида хлористым (бромистым) аллилом. *N,N*-диаллилакриламид – мономер светло-желтого цвета. $T_{пл}=135,81\pm 2$ °С. Найдено, %: С – 70,06; N – 9,06; H – 8,09.

Получение полимера

Поли-*N,N*-диаллилакриламид (ПДАА) получали в водном растворе реакцией радикальной полимеризации *N,N*-диаллилакриламида в присутствии радикального инициатора, персульфат аммония (ПСА) при температуре 60–80 °С. Синтез проводили при данной температуре в течение 5–8 часов. Поли-*N,N*-диаллилакриламид – полимер светло-желтого цвета, 147 ± 2 °С. Выход полимера 70 %, $\eta_{прив.}=0,25$ дл/г

Структура синтезированного полимера – поли-*N,N*-диаллилакриламида подтверждена ¹³С-ЯМР спектроскопией.

Методы анализа

Спектры ¹³С ЯМР регистрировались на спектрометре WP-80 фирмы «Брукер» с рабочей частотой на ядрах ¹³С 10,115 МГц, при температуре 35–40 °С. В качестве стандарта использовали внешний эталон. Химические сдвиги ¹³С ЯМР были приведены в δ-шкале и определялись относительно внешнего стандарта по формуле:

$$\delta_{TMC} = \delta + 49,5 \text{ м.д.}$$

Точность измерения химических сдвигов составила $\pm 0,03$ м.д.

Спектры ИК-спектроскопии

ИК-спектры регистрировали на Perkin Elmer (США) Spektrum Two (Нидерланды) в области $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$.

Измерение характеристической вязкости полимеров

Значения характеристической вязкости поли-N,N-диаллилакриламида были определены вискозиметрическим методом в 1 н растворе NaCl при 25 °С. Молекулярные веса определяли по формуле Марка – Хаувинка:

$$[\eta] = K \times 10^{-4} M^{\alpha},$$

где коэффициенты $K=1,12$, $\alpha=0,82$ были определены для 1н раствора NaCl при 25 °С [33].

Результаты и их обсуждение

1. Синтез и исследование структуры N, N – диаллилакриламида

Из литературы известно, что улучшение свойств полиакриламида может быть достигнуто путем введения в основную полимерную цепь гидрофобных группировок, что должно способствовать образованию ассоциирующих амфифильных полимеров с уникальными реологическими свойствами. Поэтому введение в структуру акриламида аллильных групп, по нашему мнению, должно способствовать уменьшению токсичности мономера и улучшению реологических свойств водорастворимого полимера.

Синтез N,N-диаллилакриламида проводили алкилированием акриламида хлористым (бромистым) аллилом по схеме 1.

ИК-спектр акриламида имеет специфические спектры поглощения, характерные для валентного колебания N-H первичного амида: антисимметричные 3352 см^{-1} , симметричные 3198 см^{-1} ; перекрывание валентного колебания C=O и полосы Амид (I) 1679 см^{-1} ; деформационное колебание N-H (полоса Амид (II)) 1617 см^{-1} ; присутствие валентного колебания в области 1432 см^{-1} , характерное для группы C-N (рисунк 1), что совпадает с литературными данными [34].

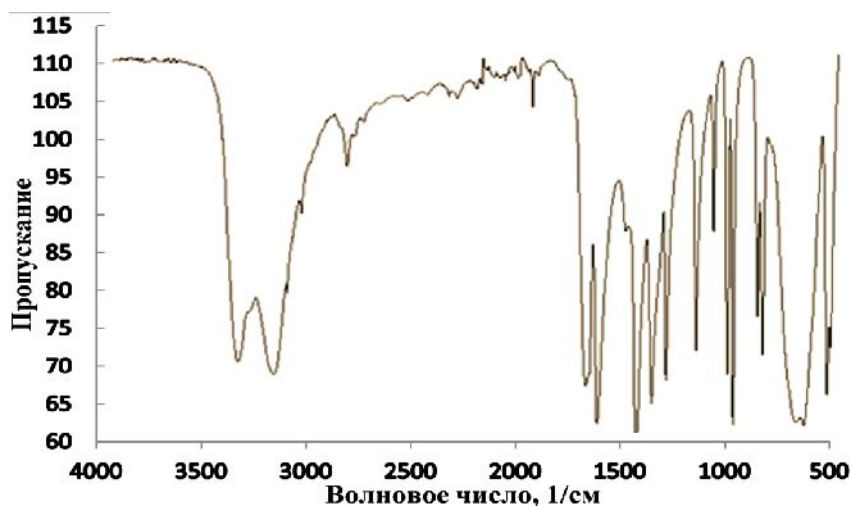


Рисунок 1 – ИК-спектр акриламида

В ИК-спектре N,N-диаллилакриламида (рисунк 2) присутствуют спектры интенсивного поглощения в области 1620 см^{-1} , характерные для несопряженной C=C-группы, а также интенсивная полоса поглощения в области 1485 см^{-1} , характерная для валентных колебаний --NR_3 , и практически отсутствуют специфические спектры поглощения, свойственные для валентного колебания N-H первичного амида: антисимметричные 3352 см^{-1} , симметричные 3198 см^{-1} .

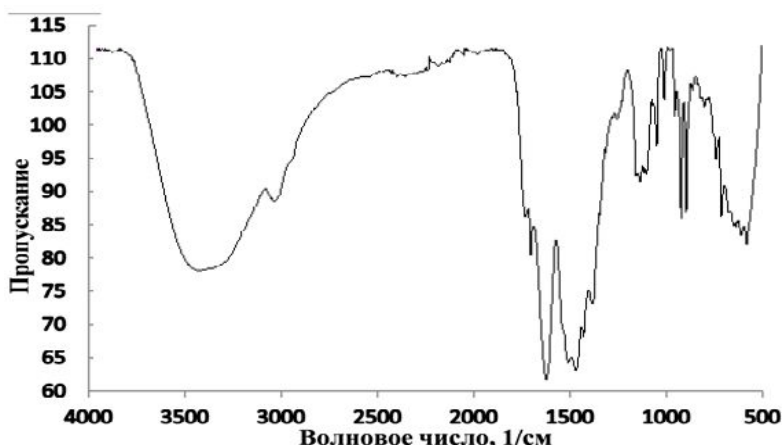


Рисунок 2 – ИК-спектр *N,N*-диаллилакриламида

Таким образом, из анализа ИК-спектра можно сделать вывод о протекании реакции алкилирования по аминогруппе с получением диаллильного мономера в протонированной форме.

Структура углеродного скелета синтезированного мономера – *N,N*-диаллилакриламида подтверждена ^{13}C -ЯМР и ^1H -ЯМР спектроскопией (рисунок 3, таблица 1), данные которой согласуются с результатами ИК-спектроскопии.

Таблица 1 – Данные ^{13}C -ЯМР спектроскопии в D_2O

Образец	^6C или $6'\text{C}$	^3C	^4C или $4'\text{C}$	^1C	^2C	^5C или $5'\text{C}$	^7C или $7'\text{C}$
ДАА	126,57	67,54	160,57	126,57	133,67	180,47	–

Ниже приведены структуры исходного акриламида и ожидаемых диаллильных производных (без учета возможного положения протона у азота). Наличие 180,4 (δ, м.д.), характерное для сопряженной группы $\text{CO}-\text{CH}=\text{CH}_2$, подтверждает наше предположение о сохранении всей группы $-\text{CH}=\text{CH}_2$, принадлежащей акриламиду.

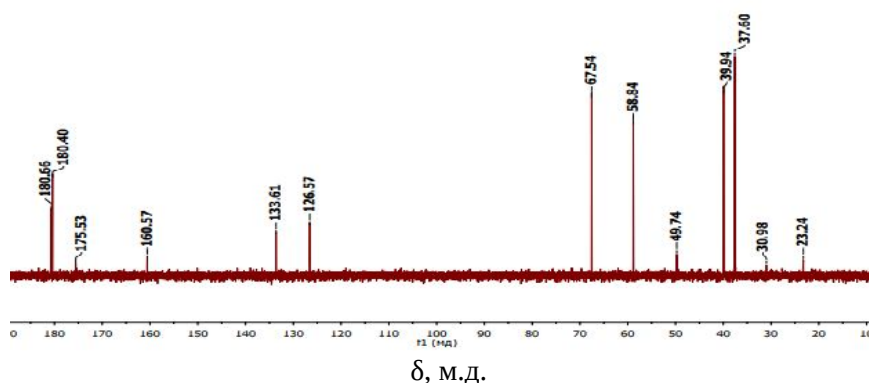
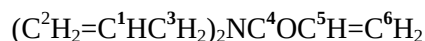
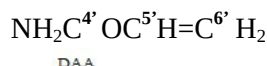


Рисунок 3 – ^{13}C -ЯМР-спектр *N,N*-диаллилакриламида

2. Исследование реакции полимеризации *N,N*-диаллилакриламида

Радикальную полимеризацию *N,N*-диаллилакриламида осуществляли в водной и водно-органических растворах в условиях радикального инициирования. Проведение реакции полимеризации без инициаторов радикального характера показало, что реакция практически не протекает. Данный факт свидетельствует об отсутствии катионной полимеризации. Результаты полимеризации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты реакции радикальной полимеризации N,N-диаллилакриламида

Мономер, [М] = 2 моль/л	Инициатор [I]=5×10 ⁻³ моль/л	Среда полимеризации	Температура, °С	Выход, %	Привед. вязкость (η _{привед}). дл/г
ДАА	[ПСА]	Вода	60	56	0,25
	[ПСА]	Вода	75	68,3	0,35
	[ПСА]	Молочная кислота в моль/моль (1:1)	60	75	0,40
	[ПСА]	Молочная кислота : мономер (моль/моль) (1:1)	75	85	0,52
	[ПБ] (перекись бензоила)	Молочная кислота : мономер (моль/моль) (1:1)	75	75,5	0,18

Как видно из таблицы 2, наиболее высокие значения приведенной вязкости были получены в среде молочной кислоты при соотношении мономер: кислота (1:1) в присутствии инициатора ПСА при температуре 75 °С.

Реакция радикальной полимеризации поли-N,N-диаллилакриламида в молочной кислоте протекает по схеме 2:

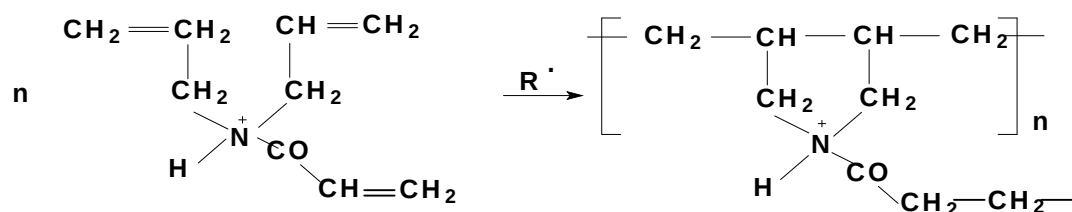
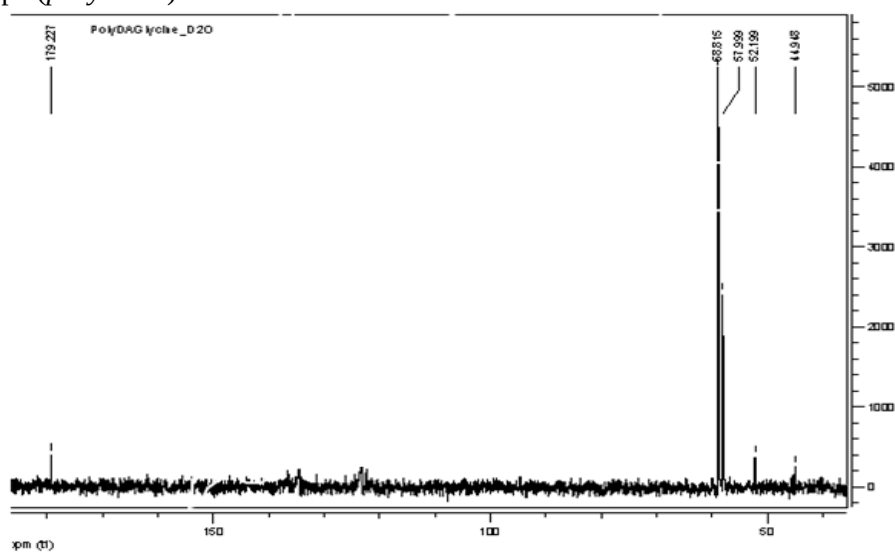


Схема 2

Структура синтезированного полилактат-N,N-диаллилакриламида установлена на основе ¹³С-ЯМР-спектра (рисунок 4).

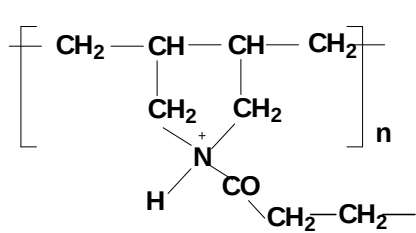


δ, м.д.

Рисунок 4 – ¹³С-ЯМР-спектр полилактат-N,N-диаллилакриламида

В качестве аналитических сигналов были выбраны сигналы при атоме азота для полилактат-*N,N*-диаллилакриламида, что согласуется с литературными данными [35–37]. Данные для поли-ЛДААА представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Данные ^{13}C -ЯМР-спектроскопии в D_2O полилактат *N,N*-диаллилакриламида

	Группа атомов углерода	Сигналы, δ м.д.
	-CH-CH- (3, 4) для поли-ДАААЛ	41,9
	$^+\text{N-CH}_2$ - (2, 5)	58,3
	-CO-	180,47

Авторы благодарят сотрудников ЦКП «Рентгеновская диагностика материалов», Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологии при КБГУ им. Х.М. Бербекова за оказанную помощь в проведении исследования.

Библиография

1. Кабанов В.А., Топчиев Д.А. Полимеризация ионизирующихся мономеров. М.: Наука, 1975. 224 с.
2. Топчиев Д.А., Малкандуев Ю.А. Катионные полиэлектролиты ряда поли-*N,N*-диалкил-*N,N*-диаллиламмоний галогенидов: Особенности процессов образования, свойства и применения. Нальчик, 1997. 240 с.
3. Арбузова И.А., Плоткина С.А. Циклическая полимеризация диаллилового эфира малеиновой кислоты // Высокомолекулярные соединения. 1964. Т. 6, № 4. С. 662–665.
4. Колесников Г.С., Давыдова С.Л. Полимеризация несопряженных диенов // Успехи химии. 1960. Т. 29, № 12. С. 1474–1485.
5. Corfield G.C., Crawshaw A. Mechanism of cyclopolymerization. Conformational analysis of cis-1,3-diisocyanatocyclohexane // J. Polym. Sci. A-1. 1969. V. 7, N 4. P. 1179–1185.
6. Аскарлов М.А., Джалилов А.Т. Синтез ионогенных полимеров. Ташкент, 1978. 158 с.
7. Hoover M.F. Cationic Quarternary Polyelectrolytes-A. Literature Review // J. Macromol. Sci.-Chem. A. 1970. V. 4, N 6. P. 1293–1300.
8. Butler G.B., Bunch R.L. Preparation and polymerization of unsaturated quarternary ammonium compounds // J. Amer. Chem. Soc. 1949. V. 71. P. 3020–3122.
9. Butler G.B. The Fundamental basis for cyclopolymerization // J. Amer. Chem. Soc. 1967. V. 8. P. 35–38.
10. Butler G.B., Raymond M.A. Probability of cyclopolymerization // J. Polym. Sci. A. 1965. V. 3, N 10. P. 3413–3420.
11. Butler G.B., Kimura S. The Fundamental basis for Cyclopolymerization // J. Macromol. Sci-Chem. A. 1971. V. 5, N 1. P. 181–209.
12. Butler G.B. Cyclopolymerization // In book: Encyclopedia of Polymer Science and Technology / Eds. Mark H.F., Caylord N.G., Bicales N.M. New-York: Int. Sci., 1966. V. 4. P. 568–598.
13. McCormick C.L., Butler G.B. Anionic Cyclopolymerization // J. Macromol. Sci-Revs., Macromol. Chem. C. 1972. V. 8, N 2. P. 201–233.
14. Gibbs W.E., Barton J.M. The mechanism of cyclopolymerization of nonconjugated diolefines // In book: Vinyl Polymerization / Ed. Ham. G.E. 1967. Part 1. V. 1. P. 59–138.
15. Solomon D.H. Cyclopolymerization. I. Structure and Mechanism // J. Macromol. Sci-Chem. A. 1975. V. 9, N 1. P. 97–113.
16. Островерхов В.Г., Бруновская Л.А., Корниенко А.А. О полимеризации некоторых *N*-диаллильных соединений // Высокомолекулярные соединения. 1964. Т. 6, № 5. С. 926–928.
17. Мацоян С.Г., Погосян Г.М., Джагамян А.О., Мушегян А.А. Исследование в области циклической полимеризации и сополимеризации. 13. Изучение циклической полимеризации *N*-замещенных диаллиламинов // Высокомолекулярные соединения. 1963. Т. 5, № 6. С. 854–860.
18. Мацоян С.Г., Погосян Г.М., Жамкочян Г.А. Циклическая полимеризация и сополимеризация. 28. Синтез и изучение циклической полимеризации некоторых *N*-замещенных производных диаллил- и диме-

тилал лиламина // Известия АН. Армянской ССР. Серия Химические науки. 1964. Т. 17, № 1. С. 62–68.

19. Щербина Ф.Ф., Федорова И.П., Горлов Ю.И. Передача цепи при полимеризации аллиламина и его ацилпроизводных // Высокомолекулярные соединения А. 1970. Т. 12, № 9. С. 2042–2045.

20. Zubov V.P., Vijaga Kumar M., Masterova M.N., Kabanov V.A. Reactivity of allyl monomers in radical polymerization // J. Macromol. Sci-Chem. A. 1979. V. 13, N 1. P. 111–131.

21. Васильева Ю.А., Малкандуев Ю.А., Тимофеева Л.М. К вопросу об активности радикалов передачи цепи на мономер при радикальной полимеризации диаллиламинов // Тезисы докладов X Межд. конф. молодых ученых по химии и химической технологии. "МКХТ-96". М., 1996. С. 92.

22. Топчиев Д.А., Сивов Н.А., Гуталс Э.Дж. Макромолекулярный дизайн новых катионных полиэлектролитов // Известия АН СССР. Серия Химические науки. 1994. № 11. С. 1976–1982.

23. Тимофеева Л.М., Клещева Н.А., Васильева Ю.А., Громова Г.Л., Тимофеева Г.И., Филатова Н.А. Механизм и кинетические особенности процессов получения новых полимеров на основе диаллиламина // Высокомолекулярные соединения А. 2005. Т. 47, № 6. С. 916–933.

24. Murzabekova T.G., Begieva M.B., Malkanduev Yu.A., Topchiev D.A. New ways in synthesis of Macromolecular cationic Polyelectrolytes based on N,N-Diallylamines // In book: 2nd IUPAC Sponsered International Symposium. Santa-Margherita Ligure, 26-31 May, 1996. Santa-Margherita Ligure, 1996. P. 148.

25. Malkanduev Yu.A., Begieva M.B., Butaeva R.J., Murzabekova T.G., Topchiev D.A. New ways in synthesis of Macromolecular ationic Polyelectrolytes based on N,N-Diallylamines // In book: 36-th IUPAC International Symposium on Macromolecul. Seoul, 4-9 August, 1996. Seoul, 1996. P. 681.

26. Малкандуев Ю.А., Бегиева М.Б., Мурзабекова Т.Г., Топчиев Д.А. Полимеризация мономеров на основе N-алкил-N,N-диаллиламинов // Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Тезисы докладов. Казань, 2003. С. 258.

27. Куренков В.Ф., Антонович О.А., Демина Т.А., Селезнева О.А. Сополимеризация натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислоты с акриламидом в водно-диметилсульфоксидных средах // Высокомолекулярные соединения А. 2003. Т. 45, № 8. С. 1246.

28. Нахманович Б.И., Урман Я.Г., Кристальный Э.В., Арест-Якубович А.А. Влияние алюминий алкилов на структуру и некоторые свойства полимеров, образующихся при анионной полимеризации N,N-диметил- и N,N-диэтилакриламида // Высокомолекулярные соединения Б. 2004. Т. 45, № 6. С. 978.

29. Егоян Р.В., Мелик-Оганджян Л.Г., Симонян Г.С., Даниелян А.В. Гомо- и сополимеры на основе N-замещенного акриламида и некоторые их свойства в растворе // Высокомолекулярные соединения Б. 2004. Т. 46, № 4. С. 729.

30. Искаков Р.М., Батырбеков Е.О., Жубанов Б.А., Kikuchi A., Okano T. Синтез и свойства новых гидрофильных сополимеров на основе карбокси-N-пропилакриламида // Высокомолекулярные соединения А. 2004. Т. 46, № 4. С. 668.

31. Роговина Л.З., Васильев В.Г., Чурочкина Н.А., Пряхина Т.А., Хохлов А.Р. Влияние условий синтеза на строение гидрофобно модифицированных полиакриламидов и реологию их растворов и гелей // Высокомолекулярные соединения А. 2004. Т. 46, № 4. С. 644.

32. Виноградова Л.В., Шаманин В.В., Kuckling D., Adler H.-J.P. Гомогенный синтез диблок-сополимеров с поли-N,N-диметилакриламидом методом анионной полимеризации в пиридине // Высокомолекулярные соединения Б. 2005. Т. 47, № 12. С. 2180.

33. Нажметдинова Г.Т. Особенности кинетики радикальной полимеризации мономеров ряда N,N-диалкил-N,N-диаллиламмоний галогенидов. Дисс... канд. хим. наук. М.: ИНХС АН СССР, 1983. 225 с.

34. Коробейничева И.К. Метод инфракрасной спектроскопии в структурных исследованиях. Новосибирск, 1977. 50 с.

35. Тимофеева Л.М., Клещева Н.А., Васильева Ю.А., Громова Г.Л., Тимофеева Г.И., Филатова Н.А. Механизм и кинетические особенности процессов получения новых полимеров на основе диаллиламина // Высокомолекулярные соединения А. 2005. Т. 47, № 6. С. 916–933.

36. Альмова А.А., Бегиева М.Б., Хараев А.М., Малкандуев Ю.А. N,N-диаллиламиноэтановая кислота и полимеры на ее основе // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2012. № 3. С. 53–58.

37. Бегиева М.Б. Синтез и исследование структуры мономеров N,N-диаллиламинокарбоновых кислот // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2013. Т. 3, № 5. С. 47–52.

References

1. Kabanov V.A., Topchiev D.A. Polymerization of ionizing monomers. Moscow: Nauka; 1975. 224 p. (In Russ.).
2. Topchiev D.A., Malkanduev Yu.A. Cationic polyelectrolytes of the poly-*N,N*-dialkyl-*N,N*-diallylammonium halides series: Features of formation processes, properties and applications. Nalchik; 1997. 240 p. (In Russ.).
3. Arbuzova I.A., Plotkina S.A. Cyclic polymerization of diallyl ester of maleic acid. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya = Polymer Science U.S.S.R.* 1964;6(4):662–665. (In Russ.).
4. Kolesnikov G.S., Davydova S.L. Polymerization of non-conjugated dienes. *Uspekhi Khimii = Russian Chemical Reviews.* 1960;29(12):1474–1485. (In Russ.).
5. Corfield G.C., Crawshaw A. Mechanism of cyclopolymerization. Conformational analysis of cis-1,3-diisocyanatocyclohexane. *J. Polym. Sci. Series A-1.* 1969;7(4):1179–1185.
6. Askarov M.A., Dzhailov A.T. Synthesis of ionogenic polymers. Tashkent; 1978. 158 p. (In Russ.).
7. Hoover M.F. Cationic Quarternary Polyelectrolytes-A. Literature Review. *J. Macromol. Sci.-Chem. Series A.* 1970;4(6):1293–1300.
8. Butler G.B., Bunch R.L. Preparation and polymerization of unsaturated quarter-nary ammonium compounds. *J. Amer. Chem. Soc.* 1949;71:3020–3122.
9. Butler G.B. The Fundamental basis for cyclopolymerization. *J. Amer. Chem. Soc.* 1967;8:35–38.
10. Butler G.B., Raymond M.A. Probability of cyclopolymerization. *J. Polym. Sci. Series A.* 1965;3(10):3413–3420.
11. Butler G.B., Kimura S. The Fundamental basis for Cyclopolymerization. *J. Macromol. Sci-Chem. Series A.* 1971;5(1):181–209.
12. Butler G.B. Cyclopolymerization. In book: *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. Eds. Mark H.F., Caylord N.G., Bicales N.M. New York: Int. Sci., 1966. V. 4. P. 568–598.
13. McCormick C.L., Butler G.B. Anionic Cyclopolymerization. *J. Macromol. Sci-Revs. Macromol. Chem. Series C.* 1972;8(2):201–233.
14. Gibbs W.E., Barton J.M. The mechanism of cyclopolymerization of nonconjugated diolefines. In book: *Vinyl Polymerization*. Ed. Ham. G.E. 1967. Part 1. V. 1. P. 59–138.
15. Solomon D.H. Cyclopolymerization. I. Structure and Mechanism. *J. Macromol. Sci-Chem. Series A.* 1975;9(1):97–113.
16. Ostroverkhov V.G., Brunovskaya L.A., Kornienko A.A. On the polymerization of some *N*-diallyl compounds. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya = Polymer Science U.S.S.R.* 1964;6(5):926–928. (In Russ.).
17. Matsoyan S.G., Pogosyan G.M., Dzhaghanyan A.O., Mushegyan A.A. Research in the field of cyclic polymerization and copolymerization. 13. Study of cyclic polymerization of *N*-substituted diallylamines. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya = Polymer Science U.S.S.R.* 1963;5(6):854–860. (In Russ.).
18. Matsoyan S.G., Pogosyan G.M., Zhamkochyan G.A. Cyclic polymerization and copolymerization. 28. Synthesis and study of cyclic polymerization of some *N*-substituted derivatives of diallyl- and dimethylallylamine. *Izvestiya Akademii Nauk Armyanskoi SSR. Seriya Khimicheskie Nauki = Bulletin of the Academy of Sciences of the Armenian USSR. Series Chemical Sciences.* 1964;17(1):62–68. (In Russ.).
19. Shcherbina F.F., Fedorova I.P., Gorlov Yu.I. Chain transfer during polymerization of allylamine and its acyl derivatives. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya A = Polymer Science. Series A.* 1970;12(9):2042–2045. (In Russ.).
20. Zubov V.P., Vijaga Kumar M., Masterova M.N., Kabanov V.A. Reactivity of allyl monomers in radical polymerization. *J. Macromol. Sci-Chem. Series A.* 1979;13(1):111–131.
21. Vasil'eva Yu.A., Malkanduev Yu.A., Timofeeva L.M. On the activity of chain transfer radicals to a monomer during radical polymerization of diallylamines. *Abstracts of reports of the X Int. Conf. of Young scientists in chemistry and chemical technology. "MKKhT-96"*. Moscow; 1996. P. 92. (In Russ.).
22. Topchiev D. A., Sivov N. A., Goethals E. J. Macromolecular design of new cationic polyelectrolytes // *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Khimicheskie Nauki = Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Series Chemical Sciences.* 1994;11:1976–1982. (In Russ.).
23. Timofeeva L. M., Kleshcheva N. A., Vasilyeva Yu. A., Gromova G. L., Timofeeva G. I., Filatova N. A. Mechanism and kinetic features of the processes of obtaining new polymers based on diallylamine. *Vy-*

sokomolekulyarnye Soedineniya A = *Polymer Science. Series A*. 2005;47(6):916–933. (In Russ.).

24. Murzabekova T.G., Begieva M.B., Malkanduev Yu.A., Topchiev D.A. New ways in synthesis of Macromolecular cationic Polyelectrolytes based on N,N-Diallyl amines. *In book: 2nd IUPAC Sponsered International Symposium*. Santa-Margherita Ligure, 26-31 May, 1996. Santa-Margherita Ligure; 1996. P. 148.

25. Malkanduev Yu.A., Begieva M.B., Butaeva R.J., Murzabekova T.G., Topchiev D.A. New ways in synthesis of Macromolecular ationic Polyelectrolytes based on N,N-Diallyl amines. *In book: 36th IUPAC International Symposium on Macromoleculs*. Seol, 4-9 August, 1996. Seol; 1996. P. 681.

26. Malkanduev Yu.A., Begieva M.B., Murzabekova T.G., Topchiev D.A. Polymerization of Monomers Based on N-Alkyl-N,N-Diallyl amines. *Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Abstracts of Reports*. Kazan; 2003. P. 258. (In Russ.).

27. Kurenkov V.F., Antonovich O.A., Demina T.A., Selezneva O.A. Copolymerization of sodium salt of 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid with acrylamide in water-dimethylsulfoxide media. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya A = Polymer Science. Series A*. 2003;45(8):1246. (In Russ.).

28. Nakhmanovich B.I., Urman Ya. G., Kristalny E.V., Arest-Yakubovich A.A. Influence of aluminum alkyls on the structure and some properties of polymers formed during anionic polymerization of N,N-dimethyl- and N,N-diethylacrylamide. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya B = Polymer Science. Series B*. 2004;45(6):978. (In Russ.).

29. Egoyan R.V., Melik-Ogandzhanyan L.G., Simonyan G.S., Danielyan A.V. Homo- and copolymers based on N-substituted acrylamide and some of their properties in solution. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya B = Polymer Science. Series B*. 2004;46(4):729. (In Russ.).

30. Iskakov R.M., Batyrbekov E.O., Zhubanov B.A., Kikuchi A., Okano T. Synthesis and properties of new hydrophilic copolymers based on carboxy-N-propylacrylamide. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya A = Polymer Science. Series A*. 2004;46(4):668. (In Russ.).

31. Rogovina L.Z., Vasiliev V.G., Churochkina N.A., Pryakhina T.A., Khokhlov A.R. Influence of Synthesis Conditions on the Structure of Hydrophobically Modified Polyacrylamides and the Rheology of Their Solutions and Gels. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya A = Polymer Science. Series A*. 2004;46(4):644. (In Russ.).

32. Vinogradova L.V., Shamanin V.V., Kuckling D., Adler H.-J.P. Homogeneous Synthesis of Diblock Copolymers with Poly-N,N-Dimethylacrylamide by Anionic Polymerization in Pyridine. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya B = Polymer Science. Series B*. 2005;47(12):2180. (In Russ.).

33. Nazhmetdinova G.T. Features of the Kinetics of Radical Polymerization of Monomers of the N,N-Dialkyl-N,N-Diallylammonium Halide Series. Diss... Cand. Sci. (Chem.) M.: INHS AN USSR; 1983. 225 p. (In Russ.).

34. Korobeinicheva I.K. Method of infrared spectroscopy in structural studies. Novosibirsk; 1977. 50 p. (In Russ.).

35. Timofeeva L.M., Kleshcheva N.A., Vasilyeva Yu.A., Gromova G.L., Timofeeva G.I., Filatova N.A. Mechanism and kinetic features of the processes for producing new polymers based on diallylamine. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya A = Polymer Science. Series A*. 2005;47(6):916–933. (In Russ.).

36. Almova A.A., Begieva M.B., Kharaev A.M., Malkanduev Yu.A. N,N-diallylaminoethanoic acid and polymers based on it. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Severo-Kavkazskii Region. Estestvennye Nauki = News of higher educational institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2012;3:53–58. (In Russ.).

37. Begieva M.B. Synthesis and study of the structure of N,N-diallylaminocarboxylic acid monomers. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University*. 2013;3(5):47–52. (In Russ.).

ХИМИЯ

Научная статья

УДК 547.458; 577.114

Природные полисахариды как полимерные системы доставки лекарственных средств для лечения заболеваний ороназофарингеальной области: современное состояние и перспективы

Анета Ахмедовна Кокоева¹, Амина Суадиновна Виндижева²

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

¹al-aneta@mail.ru

²amina.vindizheva@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к использованию природных полисахаридов – хитозана, альгината, гиалуроновой кислоты и пуллулана – в качестве полимерных матриц для доставки лекарственных средств при заболеваниях ороназофарингеальной области.

Ключевые слова: природные полисахариды, хитозан, альгинат натрия, гиалуроновая кислота, пуллулан, мукоадгезия, системы доставки лекарственных средств, ороназофарингеальная область, биосовместимость

Для цитирования: Кокоева А.А., Виндижева А.С. Природные полисахариды как полимерные системы доставки лекарственных средств для лечения заболеваний ороназофарингеальной области: современное состояние и перспективы // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 73–79.

CHEMISTRY

Original article

Natural polysaccharides as polymer drug delivery systems for the treatment of diseases of the oronasopharyngeal region: current state and prospects

Aneta A. Kokoeva¹, Amina S. Vindizheva²

^{1,2}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹al-aneta@mail.ru

²amina.vindizheva@mail.ru

Abstract. This review examines modern approaches to the use of natural polysaccharides: chitosan, alginate, hyaluronic acid, and pullulan as polymer matrices for drug delivery in diseases of the oronasopharyngeal region.

Keywords: natural polysaccharides, chitosan, sodium alginate, hyaluronic acid, pullulan, mucoadhesion, drug delivery systems, oronasopharyngeal region, biocompatibility

For citation: Kokoeva A.A., Vindizheva A.S. Natural polysaccharides as polymer drug delivery systems for the treatment of diseases of the oronasopharyngeal region: current state and prospects. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):73–79. (In Russ.).

Заболевания слизистой оболочки ороназофарингеальной области (стоматиты, гингивиты, фарингиты, пародонтиты, кандидоз, рецидивирующий афтозный стоматит) широко распространены и характеризуются склонностью к рецидивированию, что существенно снижает качество жизни пациентов. Традиционные лекарственные формы (полоскания, спреи, гели) часто обладают низкой биодоступно-

стью из-за постоянного смывания слюной, короткого времени контакта со слизистой и ферментативной деградации активных компонентов [1, 2]. В связи с этим актуальной задачей является разработка мукоадгезивных систем доставки, обеспечивающих пролонгированное высвобождение лекарственных средств и их защиту от неблагоприятных факторов ротовой полости [3, 4].

Природные полисахариды привлекают всё большее внимание исследователей благодаря уникальному сочетанию таких свойств, как биосовместимость, биodeградируемость, низкая токсичность, доступность и способность к образованию гидрогелей. Хитозан, альгинат, гиалуроновая кислота и пуллулан являются наиболее изученными представителями этого класса и демонстрируют высокий потенциал для создания систем доставки, предназначенных для топического лечения заболеваний слизистых оболочек [5, 6].

Настоящий обзор посвящен анализу современных исследований в области применения указанных полисахаридов для доставки лекарственных средств в оронозофарингеальной области.

Характеристика основных природных полисахаридов

Хитозан – линейный полисахарид, получаемый деацетилированием хитина, второго по распространенности природного полимера после целлюлозы. Химически представляет собой сополимер N-ацетил-D-глюкозамина и D-глюкозамина, соединенных β -(1→4)-гликозидными связями. Наличие свободных аминогрупп придает хитозану катионные свойства, что определяет его способность к взаимодействию с отрицательно заряженными поверхностями, включая слизистые оболочки и клеточные мембраны микроорганизмов [5, 7, 8].

В обзоре Abu Elella M.H. и Kolawole O.M. (2024) подробно рассмотрены достижения в области химической модификации хитозана для создания производных с улучшенными мукоадгезивными свойствами [5]. Авторы описывают тиолированные, акрилированные, метакрилированные, борированные и катехол-функционализированные производные, которые образуют ковалентные связи с тиольными группами муцина, обеспечивая значительно более длительное удержание на слизистой по сравнению с немодифицированным хитозаном. Такие системы перспективны для создания лекарственных форм, применяемых через слизистую оболочку полости рта, носа и других локализаций.

Альгинат – природный анионный полисахарид, выделяемый из бурых водорослей. Состоит из остатков β -D-маннуриновой и α -L-гулуриновой кислот, соединенных гликозидными связями. Уникальной особенностью альгината является способность к образованию стабильных гидрогелей в присутствии двухвалентных катионов (Ca^{2+}), а также возможность формирования динамических бороновых эфирных связей при модификации фенилбороновой кислотой [1, 9].

Liu J. с соавторами (2025) разработали инновационную систему доставки на основе модифицированного альгината – спреевый порошок быстрого гелеобразования (SRGP) для лечения рецидивирующих афтозных язв полости рта [1]. Система включает альгинат, модифицированный четвертичными аммониевыми группами для антимикробной активности, а также фенилбороновой кислотой и дофамином для образования динамических бороновых эфирных связей. При контакте со слюной SRGP образует адгезивный гидрогелевый барьер за 2 секунды и обеспечивает высвобождение лекарств в течение 12 часов и более. В экспериментах на крысах и собаках препарат, нагруженный лидокаином и дексаметазоном, достоверно снижал воспаление и сокращал время заживления на 2–3 дня по сравнению с коммерческими средствами.

Гиалуроновая кислота – линейный несulfатированный гликозаминогликан, состоящий из повторяющихся дисахаридных единиц D-глюкуроновой кислоты и N-ацетил-D-глюкозамина. Является естественным компонентом внеклеточного матрикса, участвует в регуляции пролиферации, миграции и дифференцировки клеток, модулирует воспалительный ответ [10, 11].

Halder J. с соавторами (2023) разработали нановолокна на основе гиалуроновой кислоты (мол. масса ~1500), нагруженные глицирризином, в качестве искусственной слюны для лечения орального мукозита, индуцированного химиотерапией [10]. Нановолокна, полученные методом электроспиннинга и оптимизированные с использованием подхода «качество путем разработки» (QbD), показали высокую влагоудерживающую способность (86,16 %) и эффективно снижали уровень провоспалительных цито-

кинов (IL-1 β , IL-6, TNF- α) в макрофагах RAW 264.7, сохраняя при этом высокую жизнеспособность клеток (83 %) после обработки 5-фторурацилом.

Пуллулан – микробный полисахарид, продуцируемый грибом *Aureobasidium pullulans*. Представляет собой линейный полимер из мальтотриозных единиц, соединенных α -(1 $\rightarrow$ 6)-связями. Благодаря уникальной структуре пуллулан образует прочные, эластичные и прозрачные пленки, растворимые в воде, с высокой адгезией к различным поверхностям [12–14].

Akbarzadeh M. с соавторами (2025) разработали систему с двойным паттерном высвобождения на основе орально-диспергируемых пленок из пуллулана и гидроксипропилметилцеллюлозы (ГПМЦ), содержащих мукоадгезивные наночастицы с покрытием из карбопола [12]. Наночастицы из фиброина шелка, нагруженные мидазоламом и покрытые карбополом, имели средний диаметр 260,3 нм и эффективность инкапсуляции 80,6 %. Конечный продукт продемонстрировал быстрое начальное высвобождение (45,6 % за 30 мин) с последующим пролонгированным высвобождением (91 % за 20 ч), что открывает перспективы для создания комбинированных препаратов экстренной и пролонгированной терапии.

Мукоадгезивные свойства полисахаридов

Эффективность топической терапии заболеваний ороназофарингеальной области напрямую зависит от продолжительности контакта лекарственной формы со слизистой оболочкой. Мукоадгезия – способность полимеров к взаимодействию со слоем слизи, покрывающим эпителий – обеспечивает ретенцию препарата в зоне патологического процесса и пролонгированное высвобождение активных ингредиентов [3].

Kumari A. и Singh B. (2025) в своем всестороннем обзоре, посвященном мукоадгезивным гидрогелям на основе полисахаридов, подробно анализируют теории мукоадгезии и факторы, влияющие на взаимодействие полимеров со слизью. Взаимодействие реализуется через несколько механизмов [2–4, 15, 16]:

1. Электростатические взаимодействия – характерны для катионных полимеров (хитозан), взаимодействующих с отрицательно заряженными сиаловыми остатками муцина.
2. Водородные связи – гидроксильные и карбоксильные группы полисахаридов (альгинат, гиалуроновая кислота) образуют водородные связи с гликопротеинами слизи.
3. Гидрофобные взаимодействия – играют роль при наличии гидрофобных участков в структуре полимера или после химической модификации.
4. Диффузия и межмолекулярное проникновение – цепи полимера диффундируют в сетку муцина, образуя межмолекулярные связи.
5. Образование ковалентных связей – тиолированные и катехол-функционализированные производные полисахаридов способны образовывать ковалентные связи с цистеиновыми остатками муцина, обеспечивая наиболее прочную адгезию [5].

Исследования последних лет показывают, что химическая модификация полисахаридов позволяет значительно улучшить их мукоадгезивные свойства [5, 16]. Abu Elella M.H. и Kolawole O.M. (2024) подробно описывают различные подходы к функционализации хитозана [5]:

Тиолированные производные – образуют дисульфидные связи с муцином, увеличивая время удержания в 2–10 раз.

Катехол-функционализированные производные – обеспечивают адгезию за счет образования комплексов с металлами и водородных связей, а также могут участвовать в окислительном сшивании.

Борированные производные – формируют обратимые бороновые эфирные связи с диолами муцина, что особенно перспективно для создания систем с контролируемой адгезией.

Liu J. с соавторами (2025) использовали комбинацию катехольных и бороновых групп в модифицированном альгинате для создания системы SRGP, где динамические бороновые эфирные связи обеспечивают быстрое гелеобразование и прочную адгезию к слизистой [1]. Адгезивные свойства точно регулировались путем оптимизации содержания катехольных групп.

Биологическая активность полимерных систем: антимикробные и антиоксидантные свойства

Природные полисахариды могут обладать собственной антимикробной активностью или служить матрицей для включения антибактериальных, противогрибковых и противовирусных препаратов.

Хитозан проявляет выраженную антимикробную активность в отношении широкого спектра микроорганизмов. Механизм действия связан с электростатическим взаимодействием положительно заряженных аминогрупп хитозана с отрицательно заряженными компонентами клеточной стенки, что приводит к нарушению проницаемости, выходу цитоплазматического содержимого и гибели клетки. Эффективность зависит от молекулярной массы и степени деацетилирования [4].

Альгинат и гиалуроновая кислота обладают умеренной антимикробной активностью, которая может быть усилена путем химической модификации. Liu J. с соавторами (2025) модифицировали альгинат четвертичными аммониевыми группами, что придало системе SRGP собственную антибактериальную активность [1].

Пуллулан сам по себе не проявляет выраженной антимикробной активности, однако его пленки могут служить эффективным барьером, предотвращающим колонизацию микроорганизмами, и матрицей для включения антимикробных агентов [6].

Особый интерес представляют системы, содержащие природные антимикробные соединения. Halder J. с соавторами (2023) использовали глицирризин – основной тритерпеновый сапонин из корня солодки (*Glycyrrhiza glabra*), обладающий противовоспалительной, антимикробной и антиоксидантной активностью [10]. Нановолокна на основе гиалуроновой кислоты с глицирризином показали хорошую антимикробную активность и способность снижать уровень провоспалительных цитокинов.

Окислительный стресс играет ключевую роль в патогенезе воспалительных заболеваний слизистых оболочек. Избыточная продукция активных форм кислорода (АФК) активированными нейтрофилами и макрофагами приводит к повреждению тканей, хронизации воспаления и нарушению репаративных процессов. Поэтому включение антиоксидантов в полимерные системы доставки является перспективным подходом к комплексной терапии.

Многие природные полисахариды обладают собственной антиоксидантной активностью, связанной с наличием гидроксильных групп, способных нейтрализовать свободные радикалы. Halder J. с соавторами (2023) подтвердили антиоксидантную активность разработанных нановолокон с глицирризином, что особенно важно для защиты тканей от окислительного стресса при мукозите [10].

Исследование Liu Y. с соавторами (2024) показало, что полисахарид из лекарственного гриба *Armillariella tabescens* (PAT-W) не только подавляет воспаление (снижение TNF- α , IL-1 β , IL-6), но и активирует эндогенную антиоксидантную защиту через сигнальный путь Nrf2/HO-1 в модели оральных язв у крыс [17]. Это открывает новое направление в разработке полисахаридных систем доставки – как носителей, так и активных фармацевтических ингредиентов, модулирующих клеточные защитные механизмы.

Биосовместимость и безопасность

Оценка биосовместимости является обязательным этапом доклинических исследований полимерных материалов медицинского назначения. Природные полисахариды, как правило, характеризуются высокой биосовместимостью, однако необходима тщательная оценка возможных цитотоксических, иммуногенных и мутагенных эффектов, особенно при длительном применении.

В исследованиях последних лет [16–19] применяются различные подходы к оценке биосовместимости:

- исследование цитотоксичности на культурах клеток (фибробласты, кератиноциты, эпителиоциты);
- оценка продукции провоспалительных цитокинов при контакте с полимерными материалами;
- гистологический анализ тканей после аппликации;
- исследования *in vivo* на экспериментальных животных.

Halder J. с соавторами (2023) провели комплексную оценку цитотоксичности нановолокон с глицирризином на здоровых клетках, обработанных 5-фторурацилом, и подтвердили высокий профиль безопасности (83 % жизнеспособности) [10]. Akbarzadeh M. с соавторами (2025) выполнили гистологическую оценку тканей щечной слизистой кролика после аппликации разработанных пленок и не выявили признаков повреждения микроструктуры тканей [12]. Liu J. с соавторами (2025) провели эксперименты на крысах и собаках с индуцированными оральными язвами, подтвердив безопасность и эффективность системы SRGP *in vivo* [1].

Клинические применения и перспективные направления

Современные тенденции включают создание комбинированных систем (полисахарид + природные полифенолы/терпеноиды), стимул-чувствительных систем, нановолокон и наночастиц, а также учет влияния на микробиом слизистых. Особого внимания заслуживают исследования природных полисахаридов из лекарственных грибов, обладающих собственной терапевтической активностью [17].

Наиболее разработанными лекарственными формами на основе природных полисахаридов являются мукоадгезивные гели, пленки и спреи. Инновационная система SRGP на основе модифицирован-

ного альгината сочетает удобство спреевой аппликации с быстрым образованием прочного гидрогелевого барьера, что делает ее особенно перспективной для лечения язвенных поражений слизистой [1].

Наиболее изученным является хитозан, особенно его модифицированные производные с улучшенными мукоадгезивными свойствами [5]. Альгинат перспективен для создания спреевых форм, быстро образующих гидрогель *in situ* [1]. Гиалуроновая кислота успешно применяется в составе нановолокон для создания искусственной слюны с регенеративными свойствами [10]. Пуллулан представляет особый интерес для разработки мукоадгезивных пленок и комбинированных систем с наночастицами [12].

Метод электроспиннинга позволяет получать нановолокна из растворов полисахаридов, которые по структуре напоминают внеклеточный матрикс и обеспечивают высокую площадь поверхности для адгезии и высвобождения лекарств. Halder J. с соавторами (2023) успешно применили эту технологию для создания искусственной слюны на основе гиалуроновой кислоты [10]. Akbarzadeh M. с соавторами (2025) разработали комбинированную систему, объединяющую орально-диспергируемые пленки с мукоадгезивными наночастицами для достижения двухфазного высвобождения [12].

Разработка систем, высвобождающих лекарственное средство в ответ на специфические стимулы (pH, температура, ферменты, окислительно-восстановительный потенциал), открывает возможности для таргетной терапии. Система SRGP Liu J. с соавторами (2025) использует динамические бороновые эфирные связи, которые могут быть чувствительны к pH и другим факторам микроокружения [1]. Ouyang T. с соавторами (2026) разработали термочувствительный и мукоадгезивный гидрогель на основе полоксамера 407 и альгината натрия для доставки спермидина при лечении язвенного колита [18].

Исследование Liu Y. с соавторами (2024) показало, что полисахарид из *Armillariella tabescens* не только подавляет воспаление и окислительный стресс, но и модулирует состав микробиоты полости рта, что открывает новые перспективы для создания препаратов, воздействующих на микробиом при лечении рецидивирующих заболеваний слизистой [17].

Заключение

Анализ современных литературных данных подтверждает высокий потенциал природных полисахаридов – хитозана, альгината, гиалуроновой кислоты и пуллулана – для создания систем доставки лекарственных средств при лечении заболеваний ороназофарингеальной области. Благодаря уникальному сочетанию биосовместимости, мукоадгезивных свойств, способности к образованию гидрогелей и пленок, а также собственной биологической активности, эти полимеры могут служить как самостоятельными терапевтическими агентами, так и матрицами для включения антимикробных, противовоспалительных и антиоксидантных соединений. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию составов, изучение стабильности, расширение доклинических и клинических испытаний, а также на разработку технологий масштабирования производства для обеспечения перехода от лабораторных разработок к клинической практике.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для КБГУ (FZZR - 2026-0003).

Библиография

1. Liu J., Zhang S., Feng J., Feng Z., Zhang M., Li A., Xu F. A patient-friendly sprayable rapid gelation powder (SRGP) with prolonged mucoadhesion for oral ulcer therapy // *Chemical Engineering Journal*. 2025. V. 518, N 15. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164348>.
2. Smart J.D. The basics and underlying mechanisms of mucoadhesion // *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2005. V. 57, N 11. P. 1556–1568. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2005.07.001>.
3. Kumar S., Suraj Kumar, Rishabha M., Sathvik B.S., Tarun W., Javedh S., Dhanalekshmi U. M. Polysaccharide-based implant drug delivery systems for precise therapy: Recent developments, and future trends // *Annales Pharmaceutiques Françaises*. 2024. V. 83, N 3. P. 407–427. <https://doi.org/10.1016/j.pharma.2024.12.004>.
4. Sosnik A., das Neves J., Sarmiento B. Mucoadhesive polymers in the design of nano-drug delivery systems for administration by non-parenteral routes: A review // *Progress in Polymer Science*. 2014. V. 39, N 12. P. 2030–2075. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.07.010>.
5. Abu Elella M.H., Kolawole O.M. Recent advances in modified chitosan-based drug delivery systems for transmucosal applications: A comprehensive review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. V. 277. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134531>.

6. Wróblewska-Krepsztul J., Rydzkowski T., Michalska-Požoga I. Thakur V.K. Biopolymers for Bio-medical and Pharmaceutical Applications: Recent Advances and Overview of Alginate Electrospinning // *Nanomaterials*, 2019. V. 9. P. 404. <https://doi.org/10.3390/nano9030404>.
7. Mikušová V., Mikuš P. Advances in Chitosan-Based Nanoparticles for Drug Delivery // *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. V. 22, N 17. P. 9652. <https://doi.org/10.3390/ijms22179652>.
8. Ways T.M.M., Lau W.M., Khutoryanskiy V.V. Chitosan and Its Derivatives for Application in Mucoadhesive Drug Delivery Systems // *Polymers*. 2018. V. 10, N 3. P. 267. <https://doi.org/10.3390/polym10030267>.
9. Sahoo D.R., Biswal T. Alginate and its application to tissue engineering // *SN Applied Sciences*. 2021. V. 3, N 1. P. 30. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04096-w>.
10. Halder J., Rajwar T.K., Pradhan D., Rai V.K., Dubey D., Kar B., Ghosh G., Rath G. Glycyrrhizin loaded hyaluronic acid nanofiber-based artificial saliva for the management of oral mucositis: Preparation, optimization and in-vitro evaluation // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023. V. 86. P. 104. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104777>.
11. Bayer I.S. Hyaluronic Acid and Controlled Release: A Review // *Molecules*. 2020. V. 25, N 11. P. 2649. <https://doi.org/10.3390/molecules25112649>.
12. Akbarzadeh M. Orally disintegrating films based on pullulan and HPMC with carbopol-coated mucoadhesive nanoparticles for dual-pattern drug release // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 295. P. 104–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139611>.
13. Singh R.S., Kaur N., Hassan M., Kennedy J.F. Pullulan in biomedical research and development – A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021. V. 166. P. 694–706. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.227>.
14. Pacheco M.S., Barbieri D., da Silva C.F., de Moraes M.A. A review on orally disintegrating films (ODFs) made from natural polymers such as pullulan, maltodextrin, starch, and others // *Int. J. Biol. Macromol.* 2021. V. 178. P. 504–513. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.180>.
15. Peppas N.A., Buri P.A. Surface, interfacial and molecular aspects of polymer bioadhesion on soft tissues // *Journal of Controlled Release*. 1985. V. 2. P. 257–275. [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(85\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0168-3659(85)90050-1).
16. Kumari A., Singh B. Emerging trends in designing polysaccharide based mucoadhesive network hydrogels as versatile platforms for innovative delivery of therapeutic agents: A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. V. 300. P. 649–656. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140229>.
17. Zhang K., Chen H., Hao Y., Li W., Li Y., Zhang W., Chen Y. *Armillariella tabescens* polysaccharide treated rats with oral ulcers through modulation of oral microbiota and activation of the Nrf2/HO-1 pathway // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. V. 261, N 1. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129697>.
18. Ouyang T., Ouyang S., Chen Y., Wang J., Chen Y., Tong B., Hu S., Wang L., Xu H., Mao K. Thermosensitive and mucoadhesive poloxamer 407/sodium alginate hydrogel loaded with spermidine for targeted autophagy activation and mucosal repair in ulcerative colitis // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2026. V. 335. P. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.149255>.
19. Matichescu A., Ardelean L.C., Rusu L.C., Craciun D., Bratu E.A., Babucea M., Leretter M. Advanced Biomaterials and Techniques for Oral Tissue Engineering and Regeneration-A Review. *Materials (Basel)*. 2020. V. 13, N 22. P. 5303. <https://doi.org/10.3390/ma13225303>.

References

1. Liu J., Zhang S., Feng J., Feng Z., Zhang M., Li A., Xu F. A patient-friendly sprayable rapid gelation powder (SRGP) with prolonged mucoadhesion for oral ulcer therapy. *Chemical Engineering Journal*. 2025;518(15):1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164348>.
2. Smart J.D. The basics and underlying mechanisms of mucoadhesion. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2005;571(11):1556–1568. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2005.07.001>.
3. Kumar S., Suraj Kumar, Rishabha M., Sathvik B.S., Tarun W., Javedh S., Dhanalekshmi U. M. Polysaccharide-based implant drug delivery systems for precise therapy: Recent developments, and future trends. *Annales Pharmaceutiques Françaises*. 2024;83(3):407–427. <https://doi.org/10.1016/j.pharma.2024.12.004>.
4. Sosnik A., das Neves J., Sarmiento B. Mucoadhesive polymers in the design of nano-drug delivery systems for administration by non-parenteral routes: A review. *Progress in Polymer Science*. 2014; 39(12): 2030–2075. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.07.010>.

5. Abu Elella M.H., Kolawole O.M. Recent advances in modified chitosan-based drug delivery systems for transmucosal applications: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024; 277:1–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134531>.
6. Wróblewska-Krepsztul J., Rydzkowski T., Michalska-Požoga I. Thakur V.K. Biopolymers for Bio-medical and Pharmaceutical Applications: Recent Advances and Overview of Alginate Electrospinning. *Nano-materials*. 2019;9:404. <https://doi.org/10.3390/nano9030404>.
7. Mikušová V., Mikuš P. Advances in Chitosan-Based Nanoparticles for Drug Delivery. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(17):9652. DOI: 10.3390/ijms22179652.
8. Ways T.M.M., Lau W.M., Khutoryanskiy V.V. Chitosan and Its Derivatives for Application in Mucoadhesive Drug Delivery Systems. *Polymers*. 2018;10(3):267. <https://doi.org/10.3390/polym10030267>.
9. Sahoo D.R., Biswal T. Alginate and its application to tissue engineering // *SN Applied Sciences*. 2021;3(1):30. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04096-y>.
10. Halder J., Rajwar T.K., Pradhan D., Rai V.K., Dubey D., Kar B., Ghosh G., Rath G. Glycyrrhizin loaded hyaluronic acid nanofiber-based artificial saliva for the management of oral mucositis: Preparation, optimization and in-vitro evaluation. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023;86:104. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104777>.
11. Bayer I.S. Hyaluronic Acid and Controlled Release: A Review // *Molecules*. 2020; 25(11):2649. <https://doi.org/10.3390/molecules25112649>.
12. Akbarzadeh M. Orally disintegrating films based on pullulan and HPMC with carbopol-coated mucoadhesive nanoparticles for dual-pattern drug release // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;295:104–124. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.139611>.
13. Singh R.S., Kaur N., Hassan M., Kennedy J.F. Pullulan in biomedical research and development – A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2021;166:694–706. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.227>.
14. Pacheco M.S., Barbieri D., da Silva C.F., de Moraes M.A. A review on orally disintegrating films (ODFs) made from natural polymers such as pullulan, maltodextrin, starch, and others. *Int. J. Biol. Macromol.* 2021;178:504–513. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.180>.
15. Peppas N.A., Buri P.A. Surface, interfacial and molecular aspects of polymer bioadhesion on soft tissues. *Journal of Controlled Release*. 1985; 2: 257–275. [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(85\)90050-1](https://doi.org/10.1016/0168-3659(85)90050-1).
16. Kumari A., Singh B. Emerging trends in designing polysaccharide based mucoadhesive network hydrogels as versatile platforms for innovative delivery of therapeutic agents: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;300:649–656. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140229>.
17. Zhang K., Chen H., Hao Y., Li W., Li Y., Zhang W., Chen Y. *Armillariella tabescens* polysaccharide treated rats with oral ulcers through modulation of oral microbiota and activation of the Nrf2/HO-1 pathway. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024;261(1):11. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129697>.
18. Ouyang T., Ouyang S., Chen Y., Wang J., Chen Y., Tong B., Hu S., Wang L., Xu H., Mao K. Thermosensitive and mucoadhesive poloxamer 407/sodium alginate hydrogel loaded with spermidine for targeted autophagy activation and mucosal repair in ulcerative colitis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2026;335:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.09812-5>.
19. Matichescu A., Ardelean L.C., Rusu L.C., Craciun D., Bratu E.A., Babucea M., Leretter M. Advanced Biomaterials and Techniques for Oral Tissue Engineering and Regeneration-A Review. *Materials (Basel)*. 2020;13(22):5303. <https://doi.org/10.3390/ma13225303>.

ХИМИЯ

Научная статья

УДК 541.123.31:546.786'33:546.264'33:532.773

Гетерогенное равновесие и ряд физико-химических свойств насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 30 °C

Аслан Асланбиевич Кяров¹, Радина Аслановна Мукожева², Мадзера Кадиловна Виндижева³,
Заур Анатольевич Черкесов⁴, Мария Мухамедовна Шогенова⁵

^{1,2,3,4,5}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹aslankyarov700@mail.ru

²karashaeva@mail.ru

³madzera_vin@yahoo.com

Аннотация. Изучена растворимость в системе $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 30 °C. Показано, что в системе не образуются химические соединения и твердые растворы, но при увеличении содержания вольфрамата натрия в насыщенном растворе карбоната натрия происходит дегидратация декагидрата карбоната натрия с превращением в $\beta\text{-Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$. Определены плотность, динамическая вязкость и удельная электропроводность насыщенных растворов системы, рассчитаны изотермы, мольного объема, кинематической вязкости, ионной силы, эквивалентной и приведенной электропроводности, а также кажущегося мольного объема суммы солей в растворах. Отмечается четко выраженная корреляция в изменениях этих свойств и растворимости в системе.

Ключевые слова: растворимость, физико-химические свойства, вольфраMAT натрия, карбонат натрия

Для цитирования: Кяров А.А., Мукожева Р.А., Виндижева М.К., Черкесов З.А., Шогенова М.М. Гетерогенное равновесие и ряд физико-химических свойств насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 30 °C // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 80–86.

CHEMISTRY

Original article

Phase equilibrium and specific properties of suspended solves in the $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at 30 °C

Aslan A. Kyarov¹, Radina A. Mukozheva², Madzera K. Vindizheva³, Zaur A. Cherkesov⁴, Mariya M. Shogenova⁵

^{1,2,3,4,5}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹aslankyarov700@mail.ru

²karashaeva@mail.ru

³madzera_vin@yahoo.com

Abstract. The solubility in the $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at 30 °C has been studied. It is shown that chemical compounds and solid solutions are not formed in the system, but with increasing content of sodium tungstate in saturated sodium carbonate solution dehydration of sodium carbonate decahydrate with transformation into $\beta\text{-Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$ occurs. The density, dynamic viscosity and specific electrical conductivity of satu-

rated solutions of the system have been determined, and the isotherms, molar volume, kinematic viscosity, ionic strength, equivalent and reduced electrical conductivity, and apparent molar volume of the sum of salts in the solutions have been calculated. A well-defined correlation in the changes of these properties and solubility in the system is noted.

Keywords: solubility, physical and chemical properties, sodium tungstate, sodium carbonate

For citation: Kyarov A.A., Mukozheva R.A., Vindizheva M.K., Cherkesov Z.A., Shogenova M.M. Heterogeneous equilibrium and a number of physical and chemical properties of saturated solutions in the $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at 30 °C. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026; 16(2):80–86. (In Russ.).

Введение

В связи с необходимостью создания прочной научной основы технологии регенерации соды из автоклавных растворов методом дробной кристаллизации в последнее время все больший практический интерес проявляется к исследованию политермы растворимости и свойств насыщенных растворов в системах $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$.

Пиллотон и Кроули [1] впервые изучили низкотемпературную область (от 20° до –8°) политермы растворимости и плотность насыщенных растворов в этой системе. На основе результатов этих исследований Пиллотон предложил способ извлечения соды из растворов, содержащих вольфрамат, молибдат и другие соли натрия.

С целью выявления ранее не известных и потому нереализованных возможностей значительного повышения эффективности известных способов и разработки новых способов извлечения соды из растворов нами проводится исследование политермы растворимости и свойств насыщенных растворов в системах Na_2WO_4 (Na_2MoO_4)– $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ в широких интервалах состава и температуры (от –8° до 110°). Изучены изотермы растворимости и свойств насыщенных растворов в системе при 25, 40, 75 и 100° [2–12], в результате чего выявлена пограничная (эвтоническая) кривая вторичной кристаллизации кристаллогидратов карбоната и молибдата натрия. Однако для установления границ областей кристаллизаций кристаллогидратов карбоната натрия в системе необходимо изучить фазовое равновесие в этой системе при других температурах, в особенно важных для практики пределах 5–35°, в частности при 30°.

Экспериментальная часть

Для исследования системы в качестве исходных веществ брались дважды перекристаллизованные карбонат и вольфрамат натрия марки «х.ч.» и дважды дистиллированная вода. Исследование растворимости в системе, анализ жидкой фазы и «остатков», определение свойств; насыщенных растворов и состава твердых фаз системы проводились по методике [2–3]. Полное равновесие в системе достигалось в зависимости от состава через 8–26 часов непрерывного перемешивания растворов с осадками.

Результаты исследования растворимости в системе, представленные в *таблице 1* и на *рисунке 1*, показывают, что в этой системе эвтонического типа происходят частичная дегидратация декагидрата карбоната натрия и его превращение в $\beta\text{-Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$ при увеличении содержания вольфрамата натрия в насыщенном растворе карбоната натрия до 10,25 и более масс. % Na_2WO_4 .

Таблица 1 – Растворимость в системе $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 30 °C

Номер точки	Состав жидкой фазы, масс. %		Состав «остатка», масс. %		Твердая фаза
	Na_2CO_3	Na_2WO_4	Na_2CO_3	Na_2WO_4	
1	28,44	–	36,2	–	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$
2	27,42	3,18	32,42	1,53	то же
3	27,0 9	4,22	33,23	1,85	то же
4	26,80	5,09	36,07	0,36	то же
5	26,22	7,13	30,70	4,12	то же
6	25,76	7,87	32,37	3,15	то же
7	25,38	9,39	34,50	2,02	то же

8	25,20	10,25	34,44	4,47	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O} + \beta \text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$
9	24,54	11,63	37,64	4,46	$\beta \text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$
10	23,66	13,49	40,45	3,20	то же
11	23,23	14,31	39,00	4,26	то же
12	22,84	15,16	37,75	5,31	то же
13	22,14	17,25	37,45	11,21	$\beta \text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
14	21,99	17,38	31,21	21,78	то же
15	21,84	17,51	14,66	55,57	то же
16	18,79	21,06	3,43	76,68	$\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$
17	17,47	22,71	2,40	79,29	то же
18	13,95	26,68	3,71	72,05	то же
19	8,58	32,89	1,25	80,16	то же
20	5,08	37,00	0,62	82,79	то же
21	–	42,88	–	82,35	то же

В соответствии с числом образующихся в системе твердых фаз ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$, $\beta \text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Na}_2\text{WO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) изотерма растворимости (рисунок 1) делится переходной точкой (Р) и эвтонической точкой (Е) на три ветви (АР, РЕ и ЕВ), представляющие слабо отрицательные кривые, очень мало отклоняющиеся (особенно ветви АР и ЕВ) от прямых линий.

Положение переходной точки Р (25,20 масс. % Na_2CO_3 и 10,25 масс. % Na_2WO_4) на изотерме растворимости системы определено по результатам химического анализа жидкой фазы и «остатка» одного состава системы и по точке пересечения ветвей АР и РЕ изотермы растворимости, подтверждено микрофотографическим исследованием структуры твердых фаз (ромбические кристаллы $\beta \text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и моноклинные – $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$).

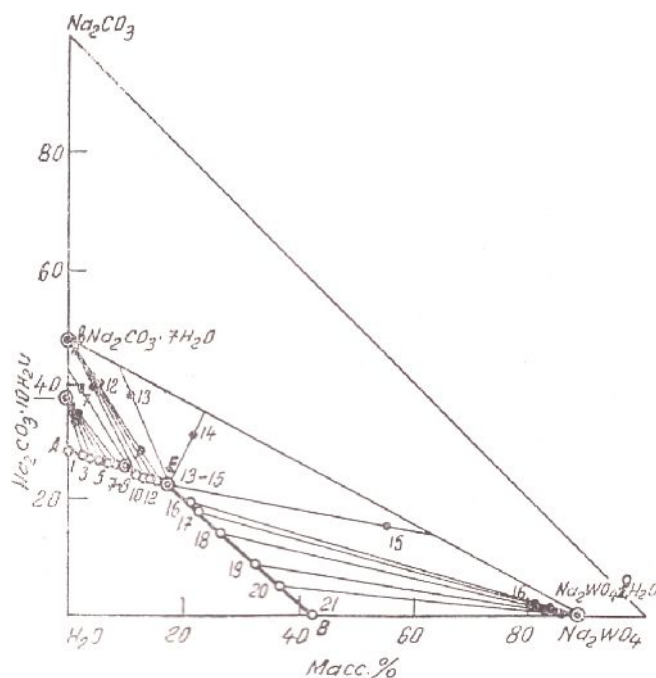


Рисунок 1 – Изотерма (30°) растворимости в системе Na_2WO_4 – Na_2CO_3 – H_2O

В эвтонике (21,99 масс. % Na_2CO_3 и 17,38 масс. % Na_2WO_4) не происходит ликвации твердых фаз по плотности, как это наблюдалось при 25° [2]. Положение эвтонической точки на изотерме растворимости (более близкое расположение к Na_2CO_3) показывает, что карбонат натрия обладает значительно

большим высаливающим действием, чем вольфрамат натрия. Это можно объяснить тем, что CO_3^{2-} , обладая большей, чем ионы WO_4^{2-} , склонностью к гидратации, значительно более прочно связывается с молекулами воды ближайшего окружения, поэтому внедрение их в насыщенный раствор вольфрамата натрия приводит к усилению взаимодействия между ионами Na^+ и WO_4^{2-} вследствие возникающего дефицита молекул воды ближайшего окружения и, следовательно, к уменьшению растворимости Na_2WO_4 . С другой стороны, присутствие ионов WO_4^{2-} и их конкурирующее влияние, в свою очередь, приводят к уменьшению устойчивости гидратированных ионов CO_3^{2-} .

Вследствие этого, в присутствии 10,25 и более масс. % Na_2WO_4 в насыщенном растворе системы при 30° твердая фаза $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ становится неустойчивой и переходит в менее гидратированный β $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, тогда как в отсутствие Na_2WO_4 в чистом насыщенном водном растворе карбоната натрия такое превращение происходит только при $35,2^\circ$.

Экспериментально определены плотность (ρ), динамическая вязкость (η) и удельная электропроводность (χ) насыщенных растворов системы. На основе полученных данных рассчитаны следующие параметры: мольный объем (V_Σ), кинематическая вязкость (γ), ионная сила (I), эквивалентная (λ) и приведенная ($\lambda\eta$) электропроводность растворов и кажущийся мольный объем суммы солей ($V_{\Sigma c}$) в этих растворах. Кроме того, для определения характера и степени взаимодействия солевых компонентов в насыщенных растворах системы нами были рассчитаны парциальные величины плотность (ρ_p), мольный объем (V_p) растворов и кажущийся мольный объем суммы солей ($V_{\Sigma c.p}$) путем аддитивного сложения (таблица 2, рисунок 2).

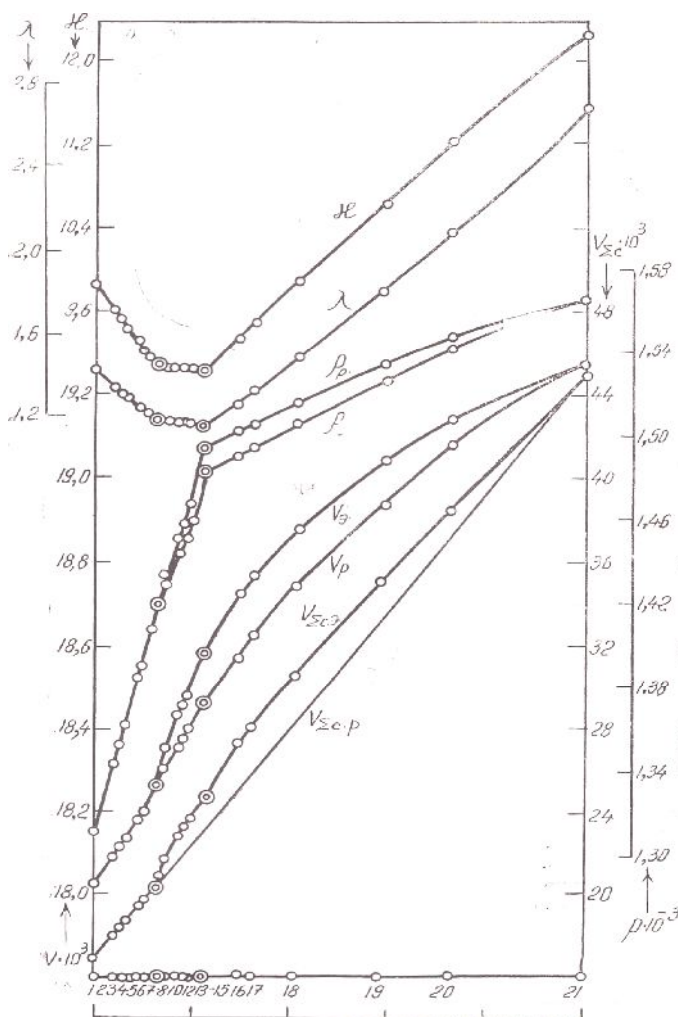


Рисунок 2 – Изотермы (30°) плотности (ρ и ρ_p), мольного объема (V_Σ и V_p), удельной (χ) и эквивалентной (λ) электропроводности насыщенных растворов и кажущегося мольного объема суммы солей ($V_{\Sigma c}$ и $V_{\Sigma c.p}$) в этих растворах системы $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$

Таблица 2 – Свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$

Номер точки	Состав солевой массы раствора, мол. %		Свойства										
	Na ₂ CO ₃	Na ₂ WO ₄	ρ ₃ ×10 ⁻³ , кг/м ³	ρ _Р ×10 ⁻³ , кг/м ³	V ₃ ×10 ³ , м ³ /кмоль	V _Р ×10 ³ , м ³ /кмоль	V _{Σ23} ×10 ³ , м ³ /кмоль	η×10 ³ , н.с/м ²	γ×10 ⁴ , м ² /с	χ _с , Ом ⁻¹ м ⁻¹	λ _с , Ом ⁻¹ м ² /кг-экв	λη _с , Ом ⁻¹ нс/кг-экв	I
1	109,0	—	1,3088	1,3008	18,018	18,018	16,895	6,66	5,09	9,86	1,494	9,35	10,536
2	95,98	4,02	1,3414	1,3412	18,087	18,089	17,978	7,13	5,32	9,58	1,325	9,45	10,846
3	94,68	5,32	1,3524	1,3522	19,111	18,114	18,345	7,27	5,38	9,51	1,302	9,47	10,953
4	93,59	6,41	1,6614	1,3612	18,133	18,134	18,676	7,46	5,48	9,44	1,283	9,52	11,035
5	91,07	8,93	1,3849	1,3808	18,182	18,184	19,384	7,75	5,60	9,30	1,236	9,58	11,286
6	90,07	9,93	1,2899	1,3895	18,197	18,202	19,597	7,88	5,67	9,24	1,232	9,62	11,251
7	88,23	11,77	1,4082	1,4084	18,245	18,241	20,255	8,11	5,76	9,14	1,196	9,66	11,466
8	87,21	12,79	1,4199	1,4205	18,266	18,263	20,522	8,22	5,79	9,11	1,177	9,67	11,614
9	85,40	14,60	1,4289	1,4326	18,348	18,300	21,669	8,41	5,89	9,06	1,169	9,83	11,622
10	82,94	17,03	1,4436	1,4501	18,434	18,351	22,837	8,64	5,99	9,04	1,163	10,05	11,656
11	81,82	18,18	1,4510	1,4572	18,452	18,374	23,089	8,71	6,00	9,03	1,162	10,15	11,661
12	80,68	19,32	1,4595	1,4636	18,475	18,399	23,384	8,83	6,05	9,03	1,158	10,25	11,695
13	78,06	21,94	1,4818	1,4915	18,581	18,460	24,703	9,20	6,21	9,02	1,137	10,46	11,896
14	77,82	22,18	1,4816	1,4926	18,583	18,463	24,752	9,22	6,22	9,01	1,140	10,51	11,851
15	77,97	22,43	1,4818	1,4908	18,580	18,467	21,733	9,21	6,22	9,01	1,144	10,53	11,809
16	71,21	28,79	1,4890	1,1008	18,719	18,572	27,098	8,01	5,38	9,34	1,260	10,09	11,121
17	68,09	31,91	1,4953	1,5052	18,769	18,622	28,026	7,41	4,956	9,48	1,309	9,70	10,860
18	59,18	40,82	1,5058	1,5166	18,877	18,743	30,434	6,05	4,018	9,91	1,479	8,95	10,048
19	41,97	58,03	1,5260	1,5340	18,040	18,910	34,968	4,48	2,936	10,62	1,804	8,08	8,830
20	27,57	72,43	1,5419	1,5469	19,138	19,076	38,434	3,71	2,416	11,22	2,093	7,76	8,042
21	—	100,0	1,5C41	1,5641	19,277	19,277	44,984	2,83	1,829	12,23	2,679	7,66	6,842

Заключение

Приведенные данные демонстрируют, что все перечисленные свойства насыщенных растворов системы закономерно отражают характер взаимодействия компонентов в системе, что подтверждается методом растворимости.

При увеличении растворимости в системе плотность и мольный объем насыщенных растворов, как правило, увеличивается. Величина этих свойств увеличивается последовательно по мере увеличения содержания Na_2WO_4 в насыщенных растворах. В области кристаллизации $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ эти свойства не отклоняются от аддитивности. Это указывает на то, что структура исходного насыщенного раствора Na_2CO_3 не изменяется заметно при увеличении в нем содержания Na_2WO_4 до переходной точки. За переходной точкой экспериментальные изотермы плотности (ρ), мольного объема (V) и кажущегося мольного объема суммы солей ($V_{\Sigma\text{с}}$) значительно отклоняются от рассчитанных по правилу смещения соответствующих изотерм этих свойств. Наибольшее отклонение (0,65 %) этих свойств от аддитивности достигается в эвтоническом растворе. Такое значительное (отрицательное для плотности и положительное для мольного объема) отклонение этих свойств от аддитивности можно объяснить сильным взаимно-разрыхляющим действием Na_2CO_3 и Na_2WO_4 на структуру их насыщенных растворов. Наиболее плотной структурой обладает насыщенный раствор Na_2CO_3 , что подтверждается значительно большим значением вязкости этого раствора ($6,66 \text{ нХс/м}^2$), чем вязкость насыщенного раствора Na_2WO_4 ($2,8 \text{ нХс/м}^2$). Также сильно различается ионная сила этих растворов.

Вязкость и приведенная электропроводность изменяются в соответствии с изменением ионной силы растворов. Изотермы этих свойств однотипны. Противоположно этим свойствам изменяются удельная и приведенная электропроводность, на характер изменения которых доминирующее влияние оказывает вязкость растворов. После исправления на вязкость изотерма (приведенной) электропроводности становится аналогичной изотерме ионной силы.

Библиография

1. Pilloton R.L., Crawley G.E. A phase equilibrium study in the system $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ // J. Electrochem. Soc. 1960. V. 107, N 7. P. 122.
2. Каров З.Г., Семенова С.Б., Чеужева Т.Н. Гетерогенное равновесие и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 25 °С // Химия и технология молибдена и вольфрама. Выпуск 1. Нальчик, 1971. С. 178.
3. Каров З.Г., Кяров А.А., Шаков З.М., Жилова С.Б. Фазовое равновесие и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ // Химия молибдена и вольфрама. Выпуск 2. Нальчик, 1983. С. 94.
4. Кяров А.А., Хочуев И.Ю., Хасанов В.В., Мирзоев Р.С., Камбачокова Л.В., Гуминюк О.И. Гетерогенное равновесие и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 27 °С // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2018. Т. 8, № 1. С. 47–51.
5. Кяров А.А., Хочуев И.Ю., Мирзоев Р.С., Балахов Э.С., Андриянова Л.А., Казиев А.С. Гетерогенное равновесие и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 20 °С // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2014. Т. 57, № 2. С. 20–24.
6. Каров З.Г., Кяров А.А. Гетерогенное равновесие и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 36 °С // Аспирант и соискатель. 2003. Т. 16, № 3. С. 158–163.
7. Каров З.Г., Кяров А.А., Шогенова З.Х. Изотерма растворимости и физико-химические свойства насыщенных растворов системы $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ // Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. 2003. № 5. С. 79–85.
8. Хочуев И.Г., Кяров А.А., Харитонов А.Ж. Гетерогенные равновесия в системе карбонат натрия-молибдат натрия-вода при 34 °С // Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. 1997. № 2. С. 28–30.
9. Каров З.Г., Кяров А.А., Хочуев И.Г., Шогенова З.Х. Исследование гетерогенного равновесия и свойств насыщенных растворов системы $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 33 °С // Вестник Кабардино-Балкарского государственного университета. 1996. № 1. С. 16–24.

10. Каров З.Г., Кяров А.А., Урусова З.Х., Афаунова Р.З. Изотерма (30 °С) растворимости и некоторые свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ // Журнал неорганической химии. 1988. Т. 33, № 11. С. 2923.

11. Каров З.Г., Кяров А.А., Лепешков И.Н., Эльмесова Р.М. Гетерогенные равновесия и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ при 100 °С // Журнал неорганической химии. 1987. Т. 32, № 2. С. 467–472.

12. Каров З.Г., Кяров А.А., Урусова З.Х. Фазовые равновесия и свойства насыщенных растворов в системе $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--NaI--H}_2\text{O}$ при 25 °С // Журнал неорганической химии. 1987. Т. 32, № 2. С. 473–479.

References

1. Pilloton R.L., Crawley G.E. A Phase Equilibrium Study of the System $\text{Na}_2\text{WO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ // *J. Electrochem. Soc.* 1960;7:122.

2. Karov Z.G., Semenova S.B., Cheuzheva T.N. Heterogeneous equilibrium and properties of saturated solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at 25 °C. Chemistry and Technology of Molybdenum and Tungsten. Issue 1. Nalchik, 1971. P. 178. (in Russ.).

3. Karov Z.G., Kyarov A.A., Shakov Z.M., Zhilova S.B. Phase equilibrium and properties of saturated solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system. Chemistry of Molybdenum and Tungsten. Issue 2. Nalchik, 1983. P. 94. (in Russ.).

4. Kyarov A.A., Khochuev I.Yu., Khasanov V.V., Mirzoev R.S., Kambachokova L.V., Guminyuk O.I. Heterogeneous Equilibrium and Properties of Saturated Solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ System at 27 °C. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2018;8(1):47–51. (in Russ.).

5. Kyarov A.A., Khochuev I.Yu., Mirzoev R.S., Balakhov E.S., Andriyanova L.A., Kaziev A.S. Heterogeneous Equilibrium and Properties of Saturated Solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ System at 20 °C // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = Chem. Chem. Tech.* 2014;57(2):20–24. (in Russ.).

6. Karov Z.G., Kyarov A.A. Heterogeneous equilibrium and properties of saturated solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system at 36 °C. *Aspirant i Soiskatel = Aspirant and Applicant*. 2003;16(3):158–163. (in Russ.).

7. Karov Z.G., Kyarov A.A., Shogenova Z.Kh. Solubility Isotherm and Physical and Chemical Properties of Saturated Solutions of the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ System. *Vestnik Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University*. 2003;5:79–85. (in Russ.).

8. Khochuev I.G., Kyarov A.A., Kharitonova A.Zh. Heterogeneous Equilibria in the System Sodium Carbonate-Sodium Molybdate-Water at 34 °C. *Vestnik Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University*. 1997;2:28–30. (in Russ.).

9. Karov Z.G., Kyarov A.A., Khochuev I.G., Shogenova Z.Kh. Investigation of Heterogeneous Equilibrium and Properties of Saturated Solutions of the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ System at 33 °C. *Vestnik Kabardino-Balkarskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Bulletin of the Kabardino-Balkarian State University*. 1996;1:16–24. (in Russ.).

10. Karov Z.G., Kyarov A.A., Urusova Z.Kh., Afauanova R.Z. Solubility isotherm (30 °C) and some properties of saturated solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ system. *Zhurnal Neorganicheskoi Khimii = Journal of Inorganic Chemistry*. 1988;33(11):2923. (in Russ.).

11. Karov Z.G., Kyarov A.A., Lepeshkov I.N., Elmesova R.M. Heterogeneous Equilibria and Properties of Saturated Solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--Na}_2\text{CO}_3\text{--H}_2\text{O}$ System at 100 °C. *Zhurnal Neorganicheskoi Khimii = Journal of Inorganic Chemistry*. 1987;32(2):467–472. (in Russ.).

12. Karov Z.G., Kyarov A.A., Urusova Z.Kh. Phase Equilibria and Properties of Saturated Solutions in the $\text{Na}_2\text{MoO}_4\text{--NaI--H}_2\text{O}$ System at 25 °C. *Zhurnal Neorganicheskoi Khimii = Journal of Inorganic Chemistry*. 1987;32(2):473–479. (in Russ.).

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64:542.952

**Исследование закономерностей деструкции
композиционных материалов на основе полиэфиров**

Мария Викторовна Подзорова¹, Игнат Антонович Суханов²

^{1,2}Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия

¹mariapdz@mail.ru

²lolk8ng065@gmail.com

Аннотация. В работе представлено исследование композиционных материалов на основе полибутиленадипаттерефталата, поликапролактона, в том числе с добавкой вторичного полиэтилена, в процессе фото- и биодеструкции.

Ключевые слова: структура, свойства, полибутиленадипаттерефталат, поликапролактон, вторичный полиэтилен, фотодеструкция, биodeградация

Для цитирования: Подзорова М.В., Суханов И.А. Исследование закономерностей деструкции композиционных материалов на основе полиэфиров // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, N 2. С. 87–94.

CHEMISTRY

Original article

Research on the Destruction Patterns of Composite Materials Based on Polyesters

Maria V. Podzorova¹, Ignat A. Sukhanov²

^{1,2}Russian University of Economics, Moscow, Russia

¹mariapdz@mail.ru

²lolk8ng065@gmail.com

Abstract. The paper presents a study of composite materials based on polybutylene adipate terephthalate, polycaprolactone, including with the addition of secondary polyethylene, in the process of photo- and biodegradation.

Keywords: structure, properties, polybutylene adipaterephthalates, polycaprolactone, recycled polyethylene, photodestruction, biodegradation

For citation: Podzorova M.V., Sukhanov I.A. Investigation of the patterns of destruction of composite materials based on polyesters. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):87–94. (In Russ.)

При рассмотрении вопросов получения новых материалов на основе биоразлагаемых полиэфиров затрагиваются различные аспекты, в том числе проблема образования отходов. Материалы на основе синтетических крупнотоннажных полимеров, благодаря низкой себестоимости производства, небольшому весу и универсальности, активно применяются в различных отраслях промышленности, в частности, при производстве упаковки, в сельском хозяйстве и медицине. Широкое использование пластмасс в сельском хозяйстве, включая мульчирующие пленки, ирригационные системы и агрохимическую изо-

ляцию, среди прочего, способствует стабилизации урожайности и повышению эффективности использования ресурсов. Однако их стойкость в почвах вызывает растущую обеспокоенность по поводу состояния окружающей среды [1]. Полевые исследования показали, что полимерное мульчирование может привести к значительному накоплению макро- и микрополимерных остатков по всему почвенному профилю, что оказывает ощутимое воздействие на структуру почвы, пористость, динамику впитывания питательных веществ и биологическую активность [2, 3].

В настоящее время сельскохозяйственные почвы являются основным источником пластикового загрязнения, причем уровни загрязнения в несколько раз превышают морские экосистемы [4]. Мульчирующие пленки, изготавливаемые преимущественно из полиэтилена (ПЭ), являются основным источником микропластикового загрязнения сельскохозяйственных почв. Долгосрочное исследование сельскохозяйственных почв, подвергшихся 32-летнему непрерывному мульчированию пленкой, показало, что на долю этих материалов приходится до 56 % от общего количества микропластиков на глубине до 100 см [5].

Биоразлагаемые полимеры, такие как полилактид (ПЛА), полибутиленадипаттерефталат (ПБАТ), поликапролактон (ПКЛ), и материалы на их основе выступают альтернативой традиционным полимерам. В то же время, в современных реалиях, экологизация промышленности все более активно пропагандирует внедрение вторичных полимерных ресурсов для создания новых материалов.

Целью данной работы является изучение процессов деструкции композиционных материалов на основе полиэфиров с добавлением вторичного полимерного сырья под воздействием различных факторов окружающей среды.

Испытания проводились на пленочных образцах на основе биоразлагаемых полимеров полибутиленадипаттерефталата (ПБАТ) марки TH801T Shanghai Hengsi New Material Science (Китай) с добавлением поликапролактона (ПКЛ) ESUN 600C (Китай). Содержание ПКЛ составляло 20, 30 масс. %. Дополнительно в полимерную матрицу вводилось 10, 20 масс. % вторичного промышленного полиэтилена низкой плотности (ПЭНПвт) (марка 15803-020, Россия). Применение вторичного полиэтилена играет ключевую роль в решении экологических, экономических и производственных задач. Это направление способствует снижению объемов пластиковых отходов, экономии природных ресурсов, снижению себестоимости продукции и созданию более устойчивой системы управления отходами. Подход, заключающийся в использовании других полимеров вместе с ПБАТ, который зарекомендовал себя как хорошая биоразлагаемая основа для создания экокомпозитов [6].

С помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC 214 Polyma (Netzsch, Германия) были определены теплофизические характеристики образцов. Испытание проводилось при скорости нагрева 10 град/мин и массе образца ($10 \pm 0,3$) мг.

Величину степени кристалличности $\chi_{кр}$ рассчитывали по формуле (1):

$$\chi_{кр} (\%) = 100 \times \Delta H_{пл} / \Delta H_{пл*}, \quad (1)$$

где $\chi_{кр}$ – степень кристалличности, $\Delta H_{пл*}$ – теплота плавления 100 % кристалла ПКЛ – 139 Дж/г [7], ПБАТ – 114 Дж/г [8], ПЭ – 293 Дж/г [9], $\Delta H_{пл}$ – теплота плавления, полученная экспериментально.

Инфракрасные спектры образцов регистрировали на ИК-Фурье-спектрометре Lumos (Bruker, Германия) при $T = (23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ в диапазоне волновых чисел $4000 \leq \nu \leq 600 \text{ см}^{-1}$ в отраженном свете методом нарушенного полного внутреннего отражения (МНПВО).

Для анализа структуры полученных материалов использовали оптический микроскоп Olympus BX3M-PSLED (Япония) при увеличении 200х в отраженном свете.

Для проведения почвенного теста грунт был приготовлен согласно ГОСТ 9.060-75 (ASTM D 5988-12). Емкости с грунтом (рН=6,5–7,5) располагались в лаборатории. Пленочные образцы выдерживали в течение 84 суток при поддержании влажности 65–75 % с периодическим контролем каждые 28 суток. Количество образцов каждого состава – 3 штуки. Все тесты проводились при температуре $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Анализ фотолитической деструкции проводился при воздействии УФ-излучения при длине волны 365 нм в течение 500 часов с использованием излучателя VL-6.LC от компании Viber Lourmat (Франция). В некоторых исследованиях [10–12] длина волны 254 нм используется для ускорения проведения испытаний.

Рентгенодифракционное исследование (РДА) структуры пленок на основе ПБАТ/ПКЛ/ПЭвт проводили на дифрактометре с оптической фокусировкой рентгеновского пучка и линейным позиционно-чувствительным детектором рентгеновского излучения. Использовали рентгеновскую трубку БСВ29Cu с

никелевым β -фильтром. Детектор рентгеновского излучения был установлен с наклоном к образцу под углом $\sim 20^\circ$. Расстояние между образцом и детектором составляло 92 мм. Ширина окна детектора была ограничена щелью до 4 мм для уменьшения инструментальных искажений дифракционной картины.

При попадании в окружающую среду, биополимеры сталкиваются с различными физическими и химическими воздействиями. В сельскохозяйственных почвах биоразлагаемые полимеры подвергаются колебаниям температуры, влажности и микробной активности, что может привести к частичному разложению и фрагментации, а не к полной минерализации полимера.

Деструкция – это разрушение полимера на более мелкие фрагменты без химических изменений, которое можно оценить с помощью таких параметров, как потеря веса или поверхности. Биодеструкция, с другой стороны, соответствует необратимому изменению материала из-за разрыва молекулярных цепей, что приводит к изменению его первоначальных свойств. Деструкция полимеров, в том числе мульчирующих материалов, в условиях окружающей среды происходит при воздействии температуры, влажности, солнечного света (абиотические факторы) и при воздействии живых организмов (биотические факторы) [13]. Биодegradация же происходит под действием микроорганизмов, таких как бактерии и грибы, которые с помощью деполимеризующих ферментов разлагают полимеры на олигомеры, димеры или мономеры. Эти соединения затем включаются в их метаболизм как источник углерода и энергии.

Фотодеструкция – один из основных агрессивных внешних факторов, оказывающий влияние на мульчирующие пленочные материалы. Сельскохозяйственные материалы на основе ПБАТ подвергаются фотодеструкции. У данного полимера разрываются преимущественно связи C–O и C–H, но экранирующие свойства бензольного кольца замедляют фотодеструкцию (рисунок 1).

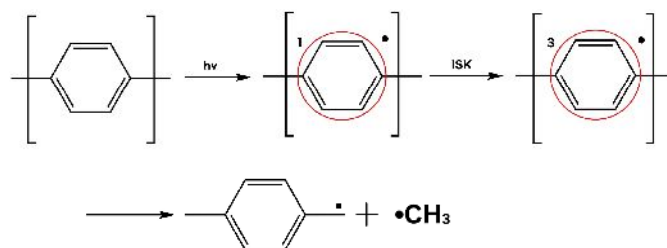


Рисунок 1 – Механизм фотодеструкции ПБАТ

Фотодеградация пленок ПКЛ протекает по механизму объемной эрозии с деструкцией в аморфных фазах. При этом повышается степень кристалличности ПКЛ из-за утолщения кристаллитов, а в результате образуются преимущественно укороченные цепи ПКЛ с концами C=O (рисунок 2).

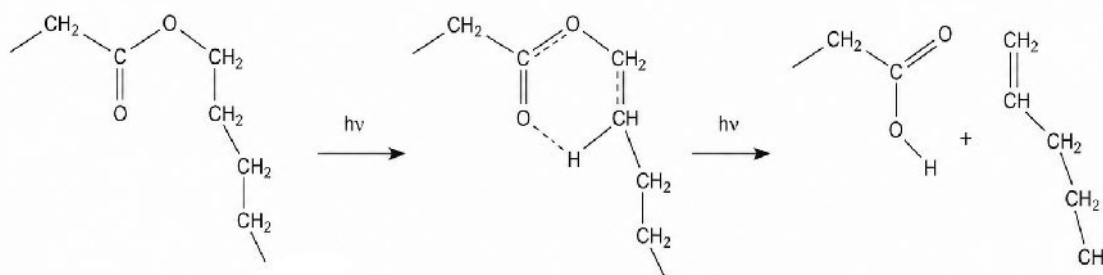


Рисунок 2 – Механизм фотодеструкции ПКЛ

Рассматривая композиционные материалы ПБАТ/ПКЛ/ПЭНПвт отмечается их подверженность фотодеструкции. Анализируя ИК-спектры (рисунок 3) отмечаются изменения в полосах после фотодеструкции. Измерения после фотодеструкции демонстрируют изменение в области «пятипалости» эфирных групп. Также образуются пики 3742 и 3820 см^{-1} , которые можно отнести к колебаниям ОН-групп. Интенсивность полосы 2950 см^{-1} снижается после воздействия УФ-излучения [14–16].

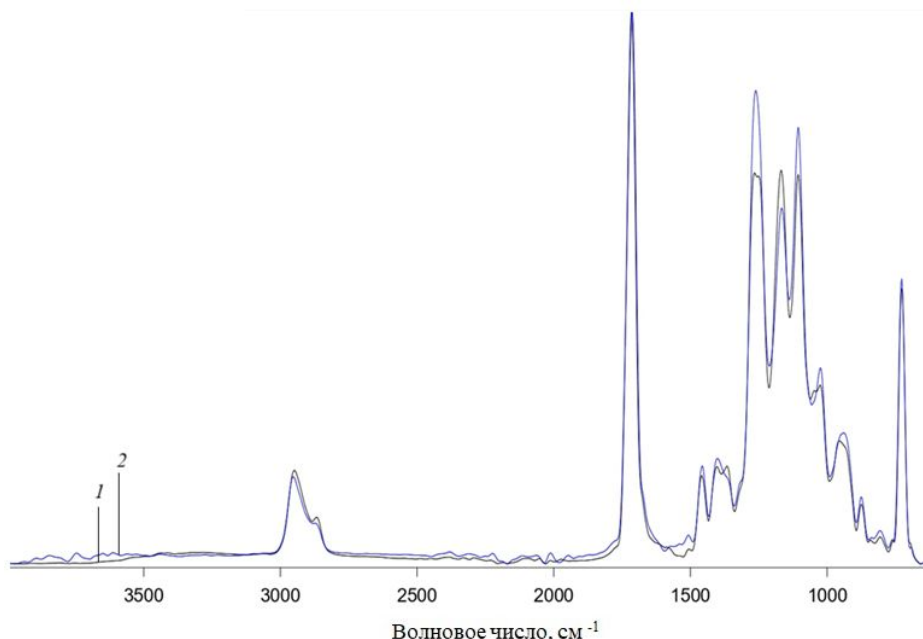


Рисунок 3 – ИК-спектры смеси 60ПБАТ/30ПКЛ/10ПЭНПвт до (1) и после (2) УФ-излучения с $\lambda=365$ нм в течение 500 часов

Фотодеструкция материалов подтверждается методом ДСК. Пик плавления ПКЛ смещается в область высоких температур в среднем на 4°C в зависимости от состава смеси, а также отмечается сужение пика, что может свидетельствовать о разрушении аморфной фазы полимера, у ПБАТ также отмечается похожая динамика. При этом пик температуры плавления ПЭНПвт уменьшился на 3°C , что может быть связано с тем, что полимер уже имеет подкисленную структуру. Степень кристалличности увеличивается у ПКЛ на 15 %, а у ПЭНПвт снижается на 3,5 %.

В процессе фрагментации происходит постепенно погружение материала в почву, на которой начинает оказывать воздействие микробиота и водная среда. Несмотря на многочисленные преимущества ПБАТ, он труднее поддается биологическому разложению и считается компостируемым пластиком. Действительно, на сегодняшний день описано лишь несколько видов микроорганизмов, выделенных из почвы и способных выступить в роли разрушителей ПБАТ, например: *Bacillus subtilis*, *Rhodococcus sp.* штамм НКСМ 2511, *Bacillus pumilus* и *Stenotrophomonas sp.* Ферменты этих микроорганизмов способны разрушать ПБАТ сообща с водной средой. Поэтому гидролитическая деструкция ПБАТ играет немаловажную роль в процессе биodeградации (рисунок 4).

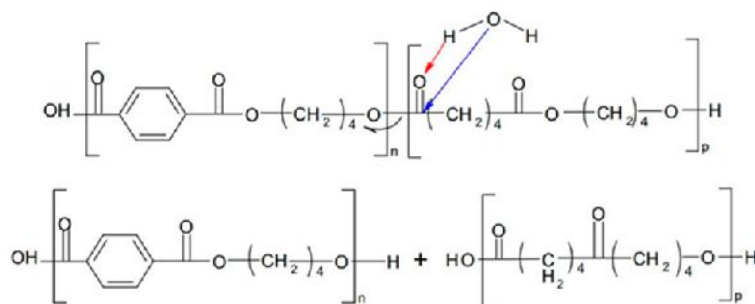


Рисунок 4 – Механизм гидролиза ПБАТ

В ферментативной деградации ПКЛ участвуют бактерии (в основном *Pseudomonas* и *Lactobacillus*) и грибы (в основном *Aspergillus*, *Candida*, *Mucor*, *Rhizopus* и *Thermomyces*). Но роль гидролиза также актуальна для данного полиэфира (рисунок 5).

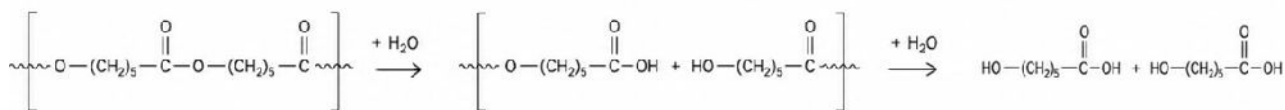


Рисунок 5 – Механизм гидролиза ПКЛ

Методом инфракрасной спектроскопии были выявлены явные изменения после инкубационного периода в почве (рисунок 6). Можно заметить появление полос в области $1650\text{--}1550\text{ см}^{-1}$, что подтверждает гидролиз сложноэфирных связей. Интенсивность характеристической ПБАТ полосы 725 см^{-1} увеличивается, что указывает на то, что разрушение композита происходит быстрее под воздействием биодеструкции. А также это может быть связано с проявлением ПЭНПвт, у которого характеристической полосой является 720 см^{-1} .

Метод рентгеновской дифрактометрии позволяет идентифицировать структуру материала, определить его кристаллическую структуру, размеры областей когерентного рассеяния и другие характеристики. Важно отметить, что для полимеров, которые имеют в своей структуре кристаллическую фазу, наблюдаются четкие рефлексы, относящиеся к различным типам кристаллических образований. На дифрактограмме образца 60ПБАТ/30ПКЛ/10ПЭНПвт (рисунок 7) наблюдается интенсивный пик $2\theta=21$ и менее интенсивный рефлекс $2\theta=23$, отмечаются и другие рефлексы. После воздействия почвы происходит изменение дифрактограммы, некоторые рефлексы исчезают. Таким образом, метод РДА, так же как ИК-спектроскопия, фиксирует изменения в структуре композиций ПБАТ/ПКЛ/ПЭНПвт после воздействия почвы.

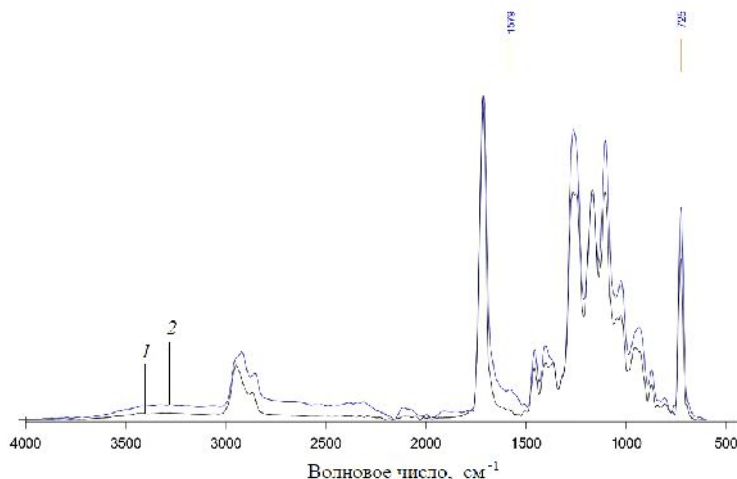


Рисунок 6 – ИК-спектры (МНПВО) исходного образца 60ПБАТ/20ПКЛ/20ПЭНПвт (1), после инкубации в почве в течение 84 суток (2)

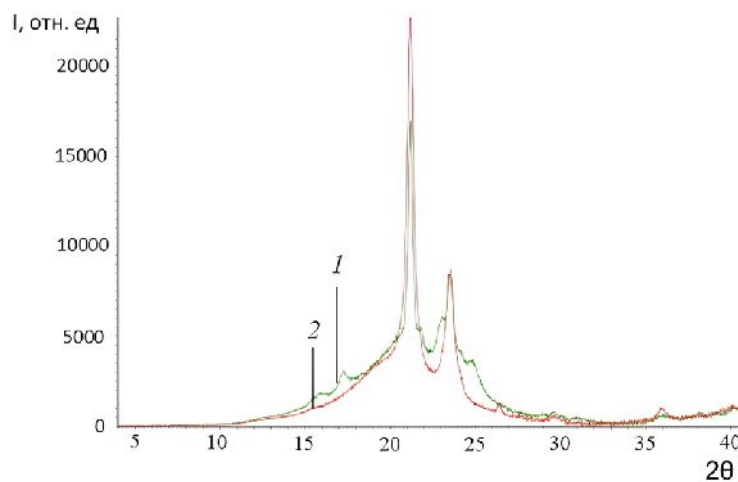


Рисунок 7 – Дифрактограммы смеси 60ПБАТ/30ПКЛ/10ПЭНПвт до (1) и после (2) воздействия почвы в течение 84 суток

Процент кристалличности от объема всей фазы ПБАТ увеличился, что указывает на то, что аморфные области разрушаются быстрее за счет большой площади поверхности молекулярного взаимодействия с ферментами и кислотами, вырабатываемыми микроорганизмами, а также водой. Это явление уже описывалось ранее, поскольку ПБАТ – это сополимер с алифатической единицей (большинство аморфных участков) и ароматической единицей (большинство кристаллических областей), более устойчивой к деградации. Повышение температуры плавления свидетельствует о том, что произошло биоразложение и гидролиз алифатической единицы, что привело к улучшению кристаллической структуры с меньшим количеством дефектов. Тем не менее температура плавления обычно снижается из-за разрыва молекулярной цепи во время деградации, однако в данной работе это не наблюдалось.

Изменения в структуре образцов были проанализированы методом ДСК и оптической микроскопии (рисунок 8). На микрофотографиях отмечается разрушение пленок, обрастание микроорганизмами.

Методом ДСК показано, что температура плавления ПБАТ увеличилась на 2–3 °С, ПКЛ – на 6–7 °С. После 84 суток инкубации в почве степень кристалличности ПБАТ увеличилась до 10–11 %, а ПКЛ – до 22–25 %, в то время как для ПЭНПвт данный показатель снизился на 1–3 %. Потеря массы ожидаемо снизилась больше всего в композите с 10 масс. % ПЭНПвт и составила 15 %. Этот результат подтвердил, что микроорганизмы более активно разрушают именно аморфную фазу полиэфиров. В случае с ПЭНПвт наблюдается уменьшение кристалличности по сравнению с исходным материалом, что может свидетельствовать о начале разрушения кристаллической фазы самого ПЭНПвт за счет каскадных реакций инициируемых биополимерами ПКЛ и ПБАТ.

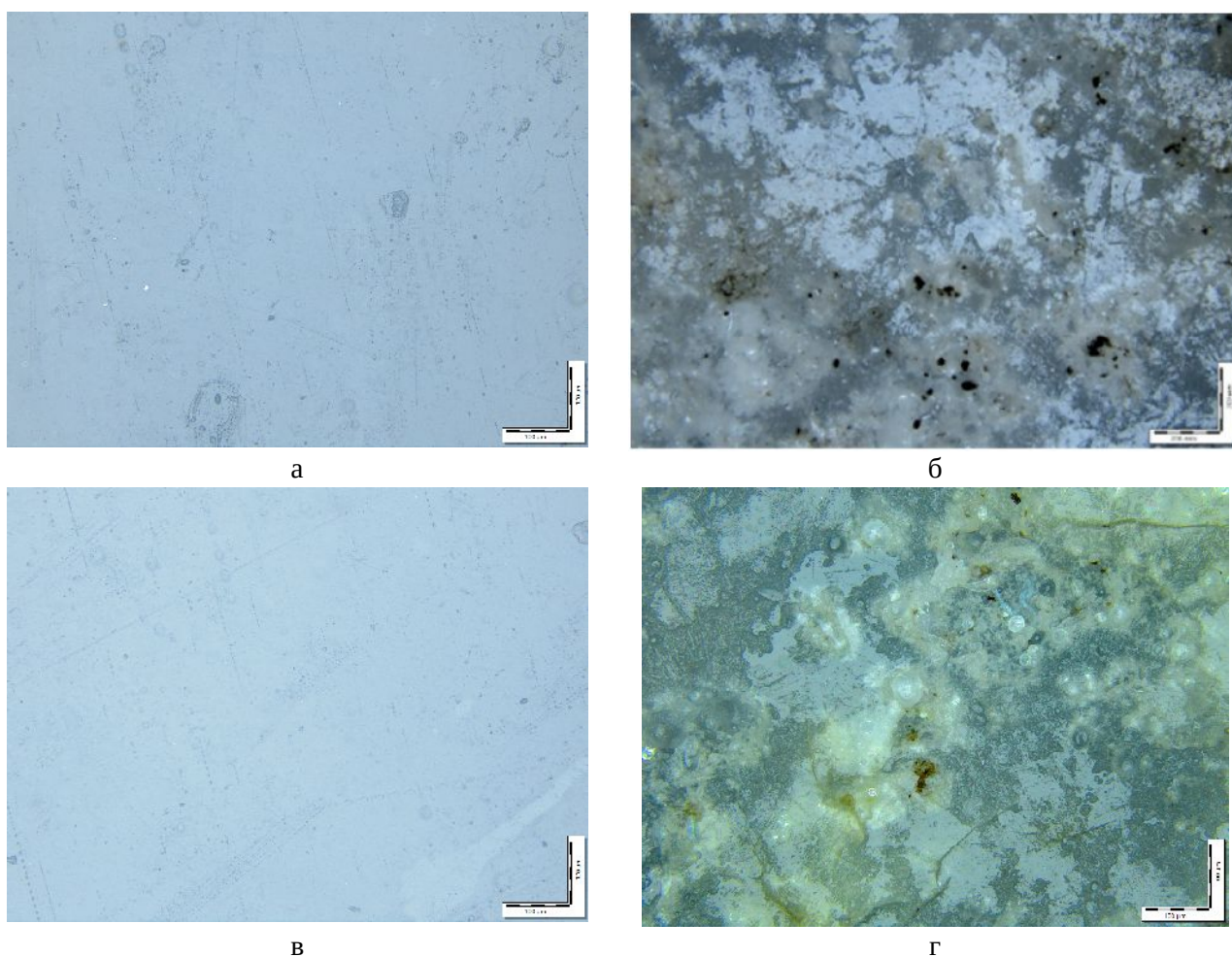


Рисунок 8 – Микрофотографии смесей 60ПБАТ/30ПКЛ/10ПЭНПвт до (а), 60ПБАТ/20ПКЛ/20ПЭНПвт до (в) и после инкубации в почве в течение 84 суток (б, г)

В данной работе было исследовано влияние фотодеструкции и биодеструкции композитов на основе полиэфиров с добавкой вторичного полиэтилена. Роль внедрения вторичного полиэтилена в мульчирующие материалы связана с решением экологических проблем, повышением устойчивости агротехнологий и расширением ассортимента доступных материалов для сельского хозяйства. Методами ДСК и ИК было подтверждено, что оба фактора оказывают воздействие на материал. После инкубации в почве на микрофотографиях отмечается биообрастание, также методом РДА подтверждается роль биодеструкции. Таким образом, результаты исследования подтверждают перспективность дальнейшей теоретической и экспериментальной работы. Полученные данные открывают возможности для практического применения похожих материалов в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства.

Библиография

1. Alcaraz-D'olera M., Ros M., Penalver R., Pascual J.A. Bioplastics in agricultural soils: Biodegradability, analytical techniques, and soil microbial impact // *J. Hazard. Mater.* 2026. V. 507. P. 141783.
2. Kurniawan T.A., Haider A., Mohyuddin A., Fatima R., Salman M., Shaheen A., Ahmad H.M., Al-Hazmi H.E., Othman M.H.D., Aziz F., Anouzla A., Ali I. Tackling microplastics pollution in global environment through integration of applied technology, policy instruments, and legislation // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 346. P. 118971.
3. Tiwari E., Sistla S. Agricultural plastic pollution reduces soil function even under best management practices // *PNAS Nexus*. 2024. V. 3. P. e433.
4. Nizzetto L., Futter M., Langaas S. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? // *Environ. Sci. Technol.* 2016. V. 50 (20). P. 10777-10779.
5. Li S., Ding F., Flury M., Wang Z., Xu L., Li S., Jones D.L., Wang J. Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching // *Environ. Pollut.* 2022. V. 300. P. 118945.
6. Será J., Kadlečková M., Fayyazbakhsh A., Kučabová V., Koutný M. Occurrence and analysis of thermophilic poly(butylene adipate-co-terephthalate)-degrading microorganisms in temperate zone soils // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21 (3). P. 1-17.
7. Ravi J., Ponnuraj K., Ragunathan P. Enzymatic biodegradation of Poly(ϵ -Caprolactone) (PCL) by a thermostable cutinase from a mesophilic bacteria *Mycobacterium marinum* // *Sci. Total Environ.* 2025. V. 972. P. 179066.
8. Deshouilles Q., Le Gall M., Benali S. et al. Hydrolytic degradation of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) – Towards an understanding of microplastics fragmentation // *Polym. Degrad. Stab.* 2022. V. 205. P. 110122.
9. Подзорова М.В., Тертышная Ю.В., Храмова А.В. Влияние воды на структуру бинарных смесей полиэтилен–полилактид и тройных смесей полиэтилен – полилактид – окисленный полиэтилен // *Журнал физической химии*. 2023. Т. 42, № 1. P. 35–42.
10. Подзорова М.В., Селезнева Л.Д., Тертышная Ю.В. Фотодеградация композитов на основе полилактида и полибутиленадипаттерефталата // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2023. Т. 72, № 6. P. 1414–1421.
11. Olewnik-Kruszkowska E., Koter I., Skopińska-Wiśniewska J., Richert J. Degradation of polylactide composites under UV irradiation at 254 nm // *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 2015. V. 311. P. 144–153.
12. Tsuji H., Echizen Y., Nishimura Y. Photodegradation of biodegradable polyesters: A comprehensive study on poly(l-lactide) and poly(ϵ -caprolactone) // *Polym. Degrad. Stab.* 2006. V. 91. P. 1128–1137.
13. Gonzaga G.L., Babetto A.S., Goncalves L.M.G., Bettini S.H.P., Souza A.M.C. Biodegradation behavior of poly(lactic acid) samples obtained by three-dimensional printing: Influence of temperature and pigment presence // *Polym. Eng. Sci.* 2024. V. 64. P. 2812–2823.
14. Wang H.J., Lin H.H.H., Hsieh M.C., Lin A.Y.C. Photoaged polystyrene microplastics serve as photosensitizers that enhance cimetidine photolysis in an aqueous environment // *Chemosphere*. 2022. V. 290. P. 133352.
15. Zeenat, Elahi A., Bukhari D.A., Shamim S., Rehman A. Plastics degradation by microbes: a sustainable approach // *J. King Saud Univ. Sci.* 2021. V. 33, N 6. P. 101538.

16. Wang J.H., Tian Y., Zhou B. Degradation and stabilization of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/polyhydroxyalkanoate biodegradable mulch films under different aging tests // *J. Polym. Environ.* 2022. V. 30, N 4. P. 1366–1379.

References

1. Alcaraz-D'olera M., Ros M., Penalver R., Pascual J.A. Bioplastics in agricultural soils: Biodegradability, analytical techniques, and soil microbial impact. *J. Hazard. Mater.* 2026;507:141783.
2. Kurniawan T.A., Haider A., Mohyuddin A., Fatima R., Salman M., Shaheen A., Ahmad H.M., Al-Hazmi H.E., Othman M.H.D., Aziz F., Anouzla A., Ali I. Tackling microplastics pollution in global environment through integration of applied technology, policy instruments, and legislation. *J. Environ. Manage.* 2023;346:118971.
3. Tiwari E., Sistla S. Agricultural plastic pollution reduces soil function even under best management practices. *PNAS Nexus.* 2024;3:e433.
4. Nizzetto L., Futter M., Langaas S. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? *Environ. Sci. Technol.* 2016;50(20):10777-10779.
5. Li S., Ding F., Flury M., Wang Z., Xu L., Li S., Jones D.L., Wang J. Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching. *Environ. Pollut.* 2022;300:118945.
6. Será J., Kadlečková M., Fayyazbakhsh A., Kučabová V., Koutný M. Occurrence and analysis of thermophilic poly(butylene adipate-co-terephthalate)-degrading microorganisms in temperate zone soils. *Int. J. Mol. Sci.* 2020;21(3):1-17.
7. Ravi J., Ponnuraj K., Ragunathan P. Enzymatic biodegradation of Poly(ϵ -Caprolactone) (PCL) by a thermostable cutinase from a mesophilic bacteria *Mycobacterium marinum*. *Sci. Total Environ.* 2025;972:179066.
8. Deshouilles Q., Le Gall M., Benali S. et al. Hydrolytic degradation of biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) – Towards an understanding of microplastics fragmentation. *Polym. Degrad. Stab.* 2022;205:110122.
9. Podzorova M.V., Tertyshnaya Yu.V., Khramkova A.V. Effect of water on the structure of polyethylene-poly lactide binary blends and polyethylene–poly lactide–aged polyethylene ternary blends. *Zhurnal Fizicheskoi Khimii = Russ. J. Phys. Chem. B.* 2023;17(1):163-170. (In Russ.).
10. Podzorova M.V., Selezneva L.D., Tertyshnaya Yu.V. Photodegradation of composites based on polylactide and polybutylene adipate terephthalate. *Izvestiya Akademii Nauk. Seriya khimicheskaya = Russ. Chem. Bull.* 2023; 72:1414-1421. (In Russ.).
11. Olewnik-Kruszkowska E., Koter I., Skopińska-Wiśniewska J., Richert J. Degradation of polylactide composites under UV irradiation at 254 nm. *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.* 2015;311:144-153.
12. Tsuji H., Echizen Y., Nishimura Y. Photodegradation of biodegradable polyesters: A comprehensive study on poly(l-lactide) and poly(ϵ -caprolactone). *Polym. Degrad. Stab.* 2006;91:1128–1137.
13. Gonzaga G.L., Babetto A.S., Goncalves L.M.G., Bettini S.H.P., Souza A.M.C. Biodegradation behavior of poly(lactic acid) samples obtained by three-dimensional printing: Influence of temperature and pigment presence. *Polym. Eng. Sci.* 2024;64:2812–2823.
14. Wang H.J., Lin H.H.H., Hsieh M.C., Lin A.Y.C. Photoaged polystyrene microplastics serve as photosensitizers that enhance cimetidine photolysis in an aqueous environment. *Chemosphere.* 2022;290:133352.
15. Zeenat, Elahi A., Bukhari D.A., Shamim S., Rehman A. Plastics degradation by microbes: a sustainable approach. *J. King Saud Univ. Sci.* 2021;33(6):101538.
16. Wang J.H., Tian Y., Zhou B. Degradation and stabilization of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/polyhydroxyalkanoate biodegradable mulch films under different aging tests. *J. Polym. Environ.* 2022; 30(4):1366–1379.

ХИМИЯ

Научная статья
УДК 541.64

Поликарбонаты триптицендиола-2,5

Константин Борисович Темираев¹, Марина Валерьевна Худоян², Ирина Владимировна Мишенина³, Геннадий Борисович Шустов⁴, Сафият Масхутовна Балаева⁵, Элина Валерьевна Хакяшева⁶

^{1,2,3}Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), Республика Северная Осетия-Алания, Владикавказ, Россия

^{4,5,6}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹temiraevkonstantin@yandex.ru

²khoudoyanmarina@mail.ru

³mishenina_inna@mail.ru

⁴alla_7583@mail.ru

⁵safiyat.balaeva@mail.ru

⁶ek_kbsu@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены синтез и свойства поликарбоната и сополикарбонатов триптицендиола-2,5. Исследованы механические свойства смесей промышленного поликарбоната и поликарбоната триптицендиола-2,5. Установлено, что поликарбонат и сополикарбонаты триптицендиола-2,5 характеризуются более высокими температурами стеклования и улучшенной химстойкостью по сравнению с поликарбонатом 2,2-ди-(4-оксифенил)-пропана. Показано также, что наличие звеньев триптицена способствует улучшению механических свойств смесей по сравнению с промышленным поликарбонатом.

Ключевые слова: синтез, свойства, поликарбонат, сополикарбонаты, триптицендиол-2,5, 2,2-ди-(4-оксифенил)-пропан

Для цитирования: Темираев К.Б., Худоян М.В., Мишенина И.В., Шустов Г.Б., Балаева С.М., Хакяшева Э.В. Поликарбонаты триптицендиола-2,5 // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 95–99.

CHEMISTRY

Original article

Triptycenediol-2,5 polycarbonates

Konstantin B. Temiraev¹, Marina V. Khudoyan², Irina V. Mishenina³, Gennady B. Shustov⁴, Safiyat M. Balaeva⁵, Elina V. Khakyasheva⁶

^{1,2,3}North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

^{4,5,6}Kh.M. Berbekov Kabardino-Balkarian State University, Nalchik, Russia

¹temiraevkonstantin@yandex.ru

²khoudoyanmarina@mail.ru

³mishenina_inna@mail.ru

⁴alla_7583@mail.ru

⁵safiyat.balaeva@mail.ru

⁶ek_kbsu@mail.ru

Abstract. The synthesis and properties of polycarbonate and copolycarbonates of triptycenediol-2,5 are considered. The mechanical properties of mixtures of industrial polycarbonate and polycarbonate of tripty-

enediol-2,5 are investigated. It is established that polycarbonate and copolycarbonates of trypticenediol-2,5 have higher glass transition temperatures and improved chemical resistance compared to polycarbonate of 2,2-di-(4-oxyphenyl)-propane. It has also been shown that the presence of trypticene units improves the mechanical properties of the mixtures compared to industrial polycarbonate

Keywords: synthesis, properties, polycarbonate, copolycarbonates, trypticenediol-2,5, 2,2-di-(4-oxyphenyl)-propane

For citation: Temiraev K.B., Khudoyan M.V., Mishenina I.V., Shustov G.B., Balaeva S.M., Khakya-sheva E.V. Triptycenediol-2,5 polycarbonates. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):95–99. (In Russ.).

Поликарбонат бисфенола А является полимером, чьи механические свойства (высокая устойчи- вость к ударным нагрузкам) не имеют аналогов среди известных термопластов.

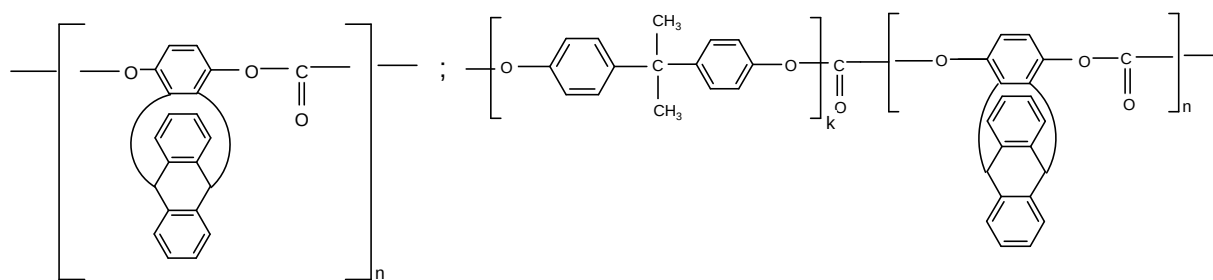
Благодаря уникальным свойствам поликарбоната, интерес к синтезу и исследованию свойств новых поликарбонатов и сополикарбонатов на основе различных бисфенолов не ослабевает [1–4].

В последнее время значительное внимание привлекает бисфенол – 9,10-дигидро-9,10-о-бензе- ноантрацен-1,4-диол (триптицендиол-2,5), который легко получают из антрацена в две стадии [5].

Благодаря уникальному строению молекулы триптицена можно ожидать, что включение его звеньев в основную цепь ПК приведет к появлению у них новых специфических и важных свойств [6–9]. Ранее [9] нами было показано, что наличие остатков триптицендиола-2,5 в макроцепях ароматических простых полиэфиров оказывает положительное влияние на комплекс их свойств [7–9].

Исходя из этого синтезированы ПК триптицендиола-2,5 и его сополикарбонаты с бисфенолом А (БфА) [10, 11]. ПК синтезировали фосгенированием смеси, содержащей триптицендиол-2,5, метилхлорид, водный гидроксид натрия, триэтиламин и *n*-трет-бутилфенол как агент обрыва цепи [10]. Кроме того, сопо- ликарбонаты триптицендиола-2,5 и БфА получены также акцепторно-каталитической поликонденсацией действием бисхлорформата БфА на смесь триптицендиола-2,5 и БфА в метилхлориде [11].

Строение поликарбоната триптицендиола-2,5 (соединение **1**), сополикарбонатов соединения **1** и БфА отражают структуры, представленные ниже.



Состав и результаты синтеза, а также некоторые характеристики полученных полимеров пред- ставлены в *таблицах 1 и 2*.

Таблица 1 – Молекулярная масса и температура стеклования полимеров [11]

Полимер	Состав полимера	Реальное соотношение	M_w , г/моль	M_n , г/моль	M_w/M_n	$T_{ст.}$, °C
БфА	100	100	–	–	–	150
БфА:1	90:10	98,5:1,5	32,860	16,100	2,04	146
БфА:1	55:45	79:21	29,610	13,410	2,21	145
БфА:1	50:50	78,4:21,6	40,710	10,790	3,77	155
1	100	100	43,500	16,110	2,70	227

Таблица 2 – Результаты испытаний на одноосное растяжение пленок поликарбонатов при комнатной температуре [11]

Материал	Толщина, мкм	Модуль Юнга, ГПа	Прочность, МПа	Удлинение при разрыве, %
БфА-ПК	12,2 (± 2)	4,43 ($\pm 0,76$)	77 (± 8)	16 (± 8)
БфА:1(90:10)	13,2 (± 8)	3,96 ($\pm 1,19$)	57 (± 17)	5 (± 2)

Синтезированные сополикарбонаты хорошо растворимы в хлорированных алифатических углеводородах и методом полива из раствора образуют прозрачные гибкие прочные пленки (таблица 2).

При включении звеньев триптицена Т_{ст.} сополикарбонатов повышается относительно ПК БфА. Это обусловлено снижением сигментальной подвижности макромолекул вследствие роста жесткости макроцепей и возникновения стерических препятствий.

Присутствие звеньев соединения **1** в сополикарбонатах приводит к некоторому понижению деформационно-прочностных свойств по сравнению с ПК БфА (таблица 2): модуля Юнга в среднем на 12 %, прочности при разрыве в среднем на 35 % и удлинения при разрыве [10].

Наличие остатков соединения **1** в макроцепях сополикарбонатов способствует повышению их устойчивости в 40 %-ном водном растворе гидроксида калия. Так, например, образец промышленного поликарбоната «Дифлон» претерпевает практически полное разрушение после трех суток экспозиции в 40 %-ном водном растворе КОН, теряя 72 % от исходной массы.

Сополикарбонат, содержащий 50 мол. % соединения **1**, за то же время в 40 %-ном КОН теряет 2 % массы [11].

Наиболее важной областью применения ПК БфА является прозрачная защита. В области прозрачной защиты ПК подвергается ударным нагрузкам при различных скоростях. Этим объясняется тот факт, что исследователи уделяют основное внимание изучению механических свойств известных и новых ПК.

В широком диапазоне скоростей были испытаны на растяжение и сжатие смеси промышленного ПК БфА марки Iupilon с ПК соединения **1** [12]. Содержание звеньев триптицена в испытуемых смесях регулировали молекулярной массой ПК соединения **1**. Низкомолекулярный ПК соединения **1** давал низкое содержание звеньев триптицена, а высокомолекулярный ПК соединения **1** приводил к более высокому содержанию звеньев триптицена в смесях.

Содержание в испытуемой смеси 1,9 масс. % триптицена позволило увеличить модуль упругости на 20 %, предела текучести на 17 % при относительном удлинении более 80 % по сравнению с Iupilon. Повышение содержания звеньев триптицена до 26 масс. % приводит к увеличению модуля упругости более чем на 20 % и росту прочности при сжатии на 50 % – как при низких, так и при высоких скоростях деформации, без снижения пластичности по сравнению с Iupilon [12]. Все образцы смесей ПК, содержащие звенья триптицена, сохраняли прозрачность и не проявляли признаков кристалличности и разделения фаз [12]. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что ПК БфА и соединения **1** при смешивании хорошо совместимы в широком диапазоне составов.

Анализ приведенных выше результатов позволяет заключить, что включение в основную цепь поликарбоната и сополикарбонатов, а также в состав физических смесей промышленного ПК звеньев триптицена позволяет существенно улучшить весь комплекс свойств получаемых материалов, представляющих интерес для современной техники.

Библиография

1. Sweileh B., Al-Hiari Yu., Kailani M.H., Mohammed H.A.Y. Synthesis and characterization of polycarbonates by melt phase interchange reactions of alkylene and arylene diacetates with alkylene and arylene diphenyl dicarbonates // Molecules. 2010. V. 15. P. 3661.
2. Анашкин Д.О. Синтез и исследование свойств новых поликарбонат-силоксанов: дисс... канд. хим. наук. М., 2006. 109 с.

3. Ning W., Zhu W., Zhang B., Li C., Liu C., Wang D. Effect of chemical structure of polycarbonates on entanglement specing // *Chinese journal of polymer science*. 2012. V. 30. P. 343.
4. Запорников В.А., Осипчик В.С., Редькина А.А. Влияние модифицирующих добавок на технологичность и физико-механические свойства поликарбоната // *Известия высш. учеб. заведений. Серия Химия и хим. технология*. 2014. Т. 57, № 4. С. 65.
5. Bartlett P.D., Ryan M.J., Cohen S.G. Triptycene (9,10-o-benzanthracene) // *J. Amer. Soc.* 1942. V. 64. P. 2649–2653.
6. Козлов Г.В., Кехарсаева Э.Р., Шогенов В.Н., Берикетов А.С., Хараев А.М., Микитаев А.К. Корреляция между деформацией полимерных пленок и молекулярными параметрами полимеров // *Высокомолек. соед. Б*. 1986. Т. 28, № 1. С. 3.
7. Carta M., Croad M., Malpass-Evans R., Jansen J.C., Bernardo P., Claricia G., Friss K., Lanc M., McKeown N.B. Triptycene induced enhancement of Membrane gas selectivity for microporous Trogers base polymers // *Advances Materials*. 2014. V. 26, N 21. P. 3526.
8. Bezzu G.C., Fuoko A., Esposito E., Monteleone M., Longo M., Jansen J.C., Nichol G.S., McKeown N.B. Ultraparmerable polymers of intrinsic microporosity (PIMs) containing spirocyclic units with fused triptycenes // *Advanced Funct. Materials*. 2021. V. 31, N 37. P. 2104474.
9. Темираев К.Б., Худоян М.В., Мишенина И.В., Шустов Г.Б., Балаева С.М., Шетов Р.А. Ароматические простые полиэфиры триптицендиола-2,5 // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2023. Т. 13, № 2. С. 80.
10. Boyles D.A., Filipova T.S., Bendler J.T. Aromatic copolycarbonates of bis-phenol A and triptycene-1,4-hydroquinone // *Polymer Preprints*. 2007. V. 48, N 1. P. 352.
11. Смирнова О.В., Микитаев А.К., Цалоева Н.Г. Сополикарбонаты на основе триптицендиола-2,5 и бисфенола А // В кн.: *Поликонденсационные процессы и полимеры*. Нальчик, 1986. С. 182.
12. Tsui N.T., Yong Y., Mulliken A.D., Lokman T., Boyce M.C., Swager T.M., Thomas E.L. Enhancement to rate-dependent mechanical behavior of polycarbonate by incorporation of triptycenes // *Polymer*. 2008. V. 49. P. 4703.

References

1. Sweileh B., Al-Hiari Yu., Kailani M.H., Mohammed H.A.Y. Synthesis and characterization of polycarbonates by melt phase interchange reactions of alkylene and arylene diacetates with alkylene and arylene diphenyl dicarbonates. *Molecules*. 2010;15:3661.
2. Anashkin D.O. Synthesis and Properties Study of New Polycarbonate-Siloxanes: PhD Thesis in Chemistry. Moscow, 2006. 109 p. (In Russ.).
3. Ning W., Zhu W., Zhang B., Li C., Liu C., Wang D. Effect of chemical structure of polycarbonates on entanglement specing. *Chinese journal of polymer science*. 2012;30:343.
4. Zapornikov V.A., Osipchik V.S., Redkina A.A. Influence of Modifying Additives on the Processability and Physical and Mechanical Properties of Polycarbonate. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Seriya Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*. 2014;57(4):65. (In Russ.).
5. Bartlett P.D., Ryan M.J., Cohen S.G. Triptycene (9,10-o-benzanthracene). *J. Amer. Soc.* 1942;64:2649–2653.
6. Kozlov G.V., Keharsaeva E.R., Shogenov V.N., Beriketov A.S., Kharaev A.M., Mikitaev A.K. Correlation between deformation of polymer films and molecular parameters of polymers. *Vysokomolekulyarnyye soyedineniya B = High-molecular compounds. Series B*. 1986;28(1):3. (In Russ.).
7. Carta M., Croad M., Malpass-Evans R., Jansen J.C., Bernardo P., Claricia G., Friss K., Lanc M., McKeown N.B. Triptycene induced enhancement of Membrane gas selectivity for microporous Trogers base polymers. *Advances Materials*. 2014;26(21):3526.

8. Bezzu G.C., Fuoko A., Esposito E., Monteleone M., Longo M., Jansen J.C., Nichol G.S., McKeown N.B. Ultrapermeable polymers of intrinsic microporosity (PIMs) containing spirocyclic units with fused triptycenes. *Advanced Funct. Materials*. 2021;31(37):2104474.
9. Temiraev K.B., Khudoyan M.V., Mishenina I.V., Shustov G.B., Balaeva S.M., Shetov R.A. Aromatic polyethers of triptycenediol-2,5. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta = Proseeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2023;13(2):80. (In Russ.).
10. Boyles D.A., Filipova T.S., Bendler J.T. Aromatic copolycarbonates of bis-phenol A and triptycene-1,4-hydroquinone. *Polymer Preprints*. 2007;48(1):352.
11. Smirnova O.V., Mikitaev A.K., Tsaloeva N.G. Copolycarbonates based on triptycenediol-2,5 and bisphenol A. In book: *Polikondensatsionnyye protsessy i polimery = Polycondensation processes and polymers*. Nalchik, 1986. P. 182.
12. Tsui N.T., Yang Y., Mulliken A.D., Torun L., Boyce M.C., Swager T.M., Thomas E.L. Enhancement to rate-dependent mechanical behavior of polycarbonate by incorporation of triptycenes. *Polymer*. 2008; 49:4703.

ХИМИЯ

Научная статья

УДК 678.744.32:541.128

Неорганические молибдаты как функциональные дымоподавляющие присадки для ПВХ-пластиков и кабелей с пониженной горючестью

Владислав Владимирович Хасанов¹, Тимур Абдулович Борукаев²

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Кабардино-Балкарская Республика, Нальчик, Россия

¹vlad.khasanov.2017@mail.ru

²boruk-chemical@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования, направленные на разработку дымоподавляющих присадок для пластифицированного поливинилхлорида на основе неорганических молибдатов. Исследовано влияние природы катиона молибдата и поверхностной модификации частиц на термическую деструкцию, дымообразование и механические свойства ПВХ-пластиков. Установлено, что модифицированные молибдаты кальция и магния обеспечивают снижение дымности до 55 % и повышение температуры начала разложения на 30-35 °С. Показана перспективность применения молибдатных присадок при создании малодымных ПВХ-композиций технического назначения.

Ключевые слова: поливинилхлорид, пластикат, дымоподавляющие присадки, молибдаты, свойства

Для цитирования: Хасанов В.В., Борукаев Т.А. Неорганические молибдаты как функциональные дымоподавляющие присадки для ПВХ-пластиков и кабелей с пониженной горючестью // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 100–105.

CHEMISTRY

Original article

Inorganic molybdates as functional flame-retardant additives for PVC-plastics and low-flammability cables

Vladislav V. Khasanov¹, Timur A. Borukaev²

^{1,2}Kabardino-Balkarian State University, Kabardino-Balkarian Republik, Nal'chik, Russia

¹vlad.khasanov.2017@mail.ru

²boruk-chemical@mail.ru

Abstract. The paper presents dissertation research results aimed at the development of smoke-suppressing additives for plasticized polyvinyl chloride based on inorganic molybdates. The influence of molybdate cation nature and surface modification on thermal degradation, smoke formation, and mechanical properties of PVC plasticates is studied. Modified calcium and magnesium molybdates were shown to reduce smoke density by up to 55 % and increase the onset decomposition temperature by 30-35 °C. The obtained results demonstrate the prospects of molybdate additives for low-smoke PVC materials.

Keywords: polyvinyl chloride, PVC plasticate, smoke suppression, molybdates, thermal degradation

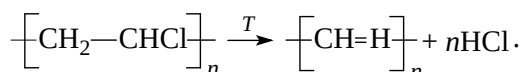
For citation: Khasanov V.V., Borukaev T.A. Inorganic molybdates as functional flame-retardant addi-

tives for PVC-plastics and low-flammability cables. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026;16(2):100–105. (In Russ.).

Введение

Пластифицированный поливинилхлорид широко применяется в строительстве, кабельной промышленности и производстве технических изделий. Существенным недостатком ПВХ является интенсивное дымообразование при термическом воздействии, обусловленное дегидрохлорированием макромолекул и образованием полиеновых и ароматических структур [1, 2].

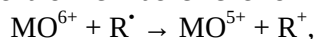
Термическая деструкция ПВХ начинается с реакции дегидрохлорирования:



Выделяющийся хлористый водород катализирует дальнейшее разложение, что приводит к образованию сажи и дыма. Введение молибдатных присадок позволяет:

- замедлять автокаталитическое дегидрохлорирование;
- снижать концентрацию свободных радикалов;
- способствовать формированию защитного минерального остатка.

Редокс-активность ионов молибдена описывается схемой



что приводит к обрыву цепных реакций термического разложения.

Одним из перспективных направлений снижения дымообразования является использование неорганических дымоподавляющих присадок, способных ингибировать процессы термической деструкции и способствовать формированию защитного минерального слоя [3-6]. В данной работе рассматриваются неорганические молибдаты как функциональные дымоподавляющие добавки для ПВХ-пластиков.

Цель работы – разработка и исследование дымоподавляющих присадок на основе неорганических молибдатов для ПВХ-пластиков.

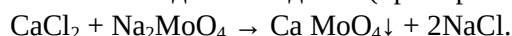
Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- синтез молибдатов щелочных и щелочноземельных металлов;
- модификация поверхности молибдатных частиц для повышения их совместимости с ПВХ;
- исследование влияния молибдатов на термическую стабильность и дымообразование ПВХ-пластиков;
- оценка изменения механических свойств композиций.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись ПВХ-пластики, содержащие молибдаты натрия, кальция и магния. Содержание молибдатов варьировали в интервале от 2 до 10 масс. %. В качестве исходного ПВХ пластика использовали промышленную марку И40-13А.

Синтез молибдатов осуществляли методом осаждения (пример получения молибдата кальция):



Модификацию поверхности частиц молибдатов проводили стеаратом натрия при 80–90 °С.

Методы исследования включали:

- термогравиметрический анализ;
- определение дымности по оптической плотности продуктов горения;
- механические испытания при растяжении;
- морфологический анализ распределения присадок.

Результаты и обсуждение

Термическая стабильность. Установлено, что введение молибдатных присадок приводит к смещению температуры начала термической деструкции ПВХ пластика (рисунки 1, 2), а также температуры (рисунки 3), соответствующей 10 % потери массы, в область более высоких температур. Максимальный эффект наблюдается для модифицированного молибдата кальция (рисунки 2, кривая 3). Добавки молибдатов повысили температуру начала разложения ПВХ пластика на 15–35 °С по сравнению с

исходным компаундом (без молибдатов). Наиболее эффективным оказался CaMoO_4 , обработанный стеаратом кальция (повышение более чем на 30 °C).

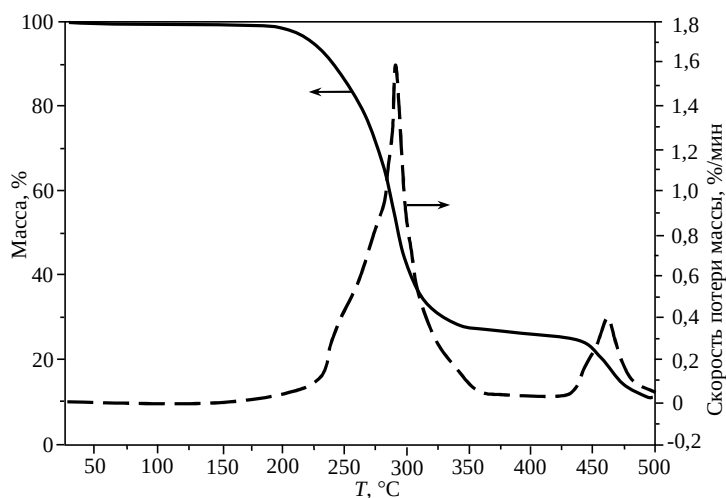


Рисунок 1 – Термогравиметрические кривые ПВХ-пластиков (контрольный образец)

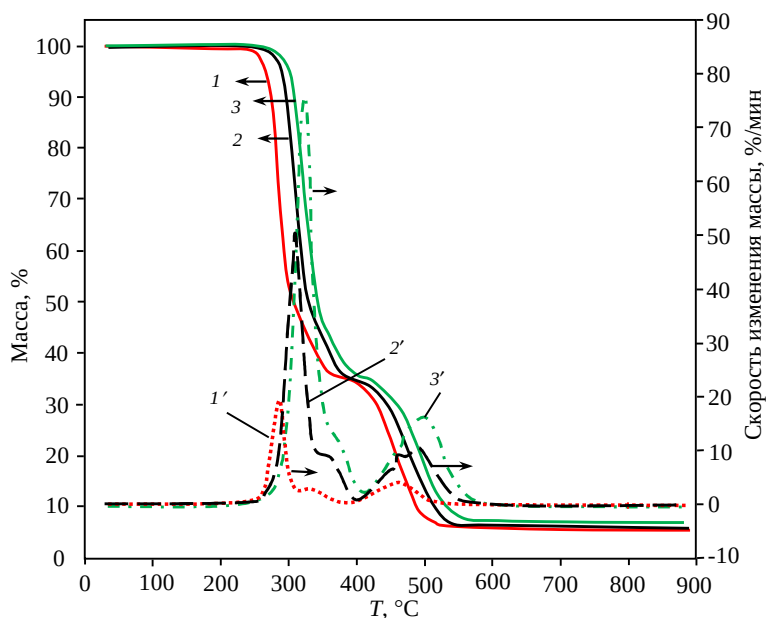


Рисунок 2 – Термогравиметрические кривые для ПВХ-пластиков: 1, 1' – ПВХ + 5 % CaMoO_4 ; 2, 2' – ПВХ + 10 % CaMoO_4 ; 3, 3' – ПВХ + 10 % модиф. CaMoO_4

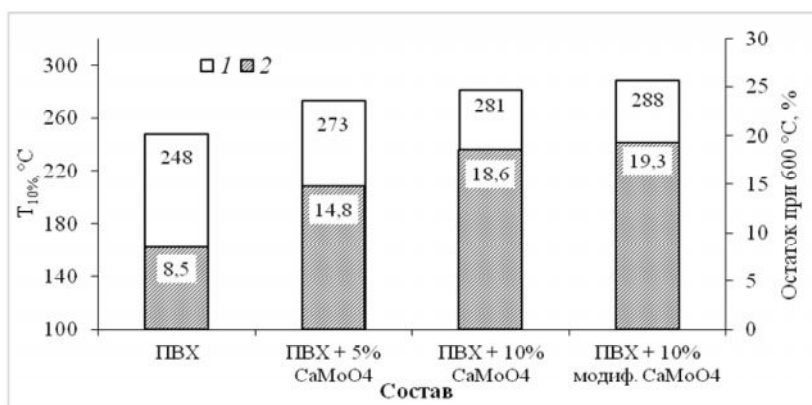


Рисунок 3 – Зависимость температуры потери 10 % массы (1) и остатка при 600 °C (2) по результатам ТГА ПВХ-пластиков

Дымоподавление. Сравнение горения и дымообразования у образцов ПВХ-пластиков по-

казаны на рисунке 4.

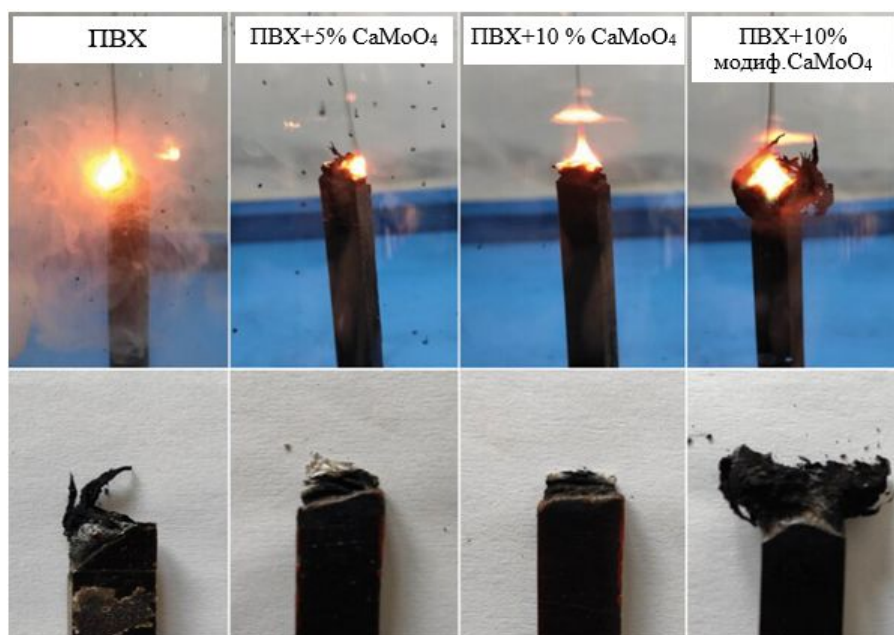


Рисунок 4 – Сравнение горения и дымообразования ПВХ-пластиков

Анализ результатов эксперимента (рисунки 5 и 6) показал, что эффективность дымоподавления определяется не только концентрацией молибдата (рисунки 5 и 6), но и степенью его диспергирования в полимерной матрице (рисунок 6). Дымность, оцениваемая по оптической плотности продуктов горения, снижалась на 45–70 % при добавлении 5–10 масс. % модифицированных молибдатов.

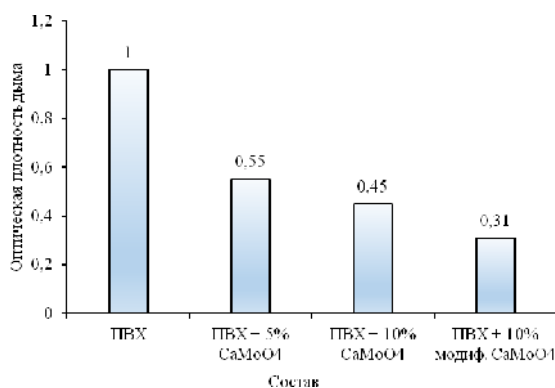


Рисунок 5 – Оптическая плотность дыма при сгорании ПВХ-пластиков

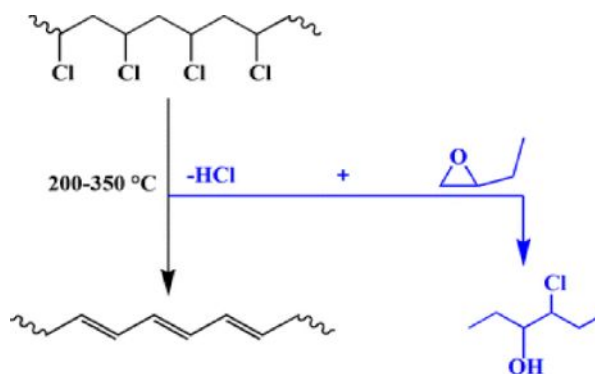


Рисунок 6 – Схематическое представление механизма дымоподавления ПВХ молибдатными присадками

Комбинация молибдатов щелочноземельных металлов продемонстрировала более высокую эффективность по сравнению с молибдатами щелочных металлов. Это подтверждается данными всех представленных диаграмм и микрофотографий и объясняется формированием более устойчивой оксидной фазы, а также образованием адсорбционного слоя продуктов разложения.

Механические свойства. На основании экспериментальных данных предложен механизм комплексного дымоподавляющего действия молибдатов, включающий ингибирование дегидрохлорирования, обрыв радикальных цепей и формирование защитного оксидного слоя.

Композиции, содержащие до 10 масс. % молибдатов с модифицированной поверхностью, сохраняли прочностные характеристики на уровне контрольных материалов. Более высокие концентрации (> 12 масс. %) приводили к некоторому ухудшению удлинения при разрыве, что связано с агрегированием частиц.

Морфология. На основании экспериментальных данных предложен механизм комплексного ды-

моподавляющего действия молибдатов, включающий ингибирование дегидрохлорирования, обрыв радикальных цепей и формирование защитного оксидного слоя. Микроструктурный анализ (рисунок 7) показал, что поверхностная модификация молибдатов обеспечивает более равномерное распределение частиц в ПВХ-матрице и снижает их агрегацию.

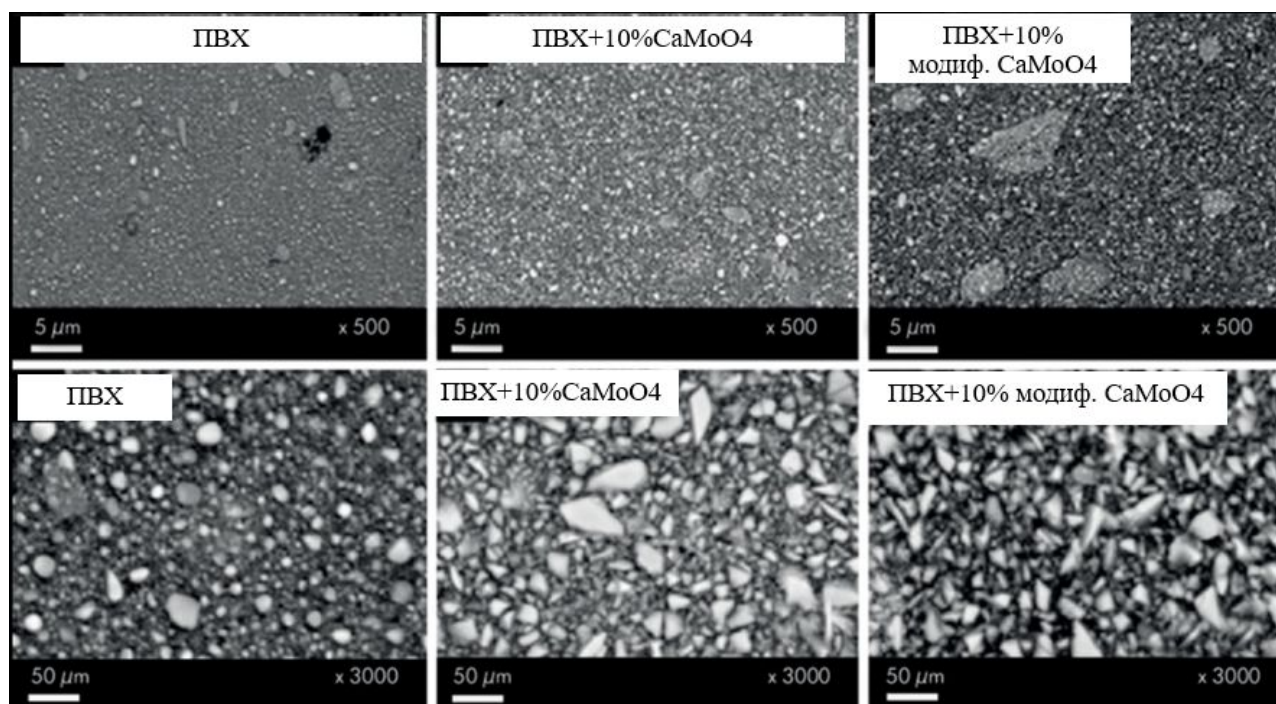


Рисунок 7 – СЭМ-изображения структуры ПВХ-пластиков

Заключение

Результаты проведённого исследования показали, что неорганические молибдаты, особенно молибдаты кальция и магния с поверхностной модификацией, являются эффективными дымоподавляющими присадками для ПВХ-пластиков. Их использование позволяет существенно снизить дымообразование и повысить термическую стабильность материала без существенного ухудшения механических свойств.

Библиография

1. Рабинович А.М. Поливинилхлорид и композиционные материалы на его основе. М.: Химия, 2016. 320 с.
2. Кузнецов Н.Н., Смирнов В.А. Дымообразование полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2018. 284 с.
3. Chen J., Li Q. Effect of molybdate compounds on thermal degradation of PVC // Polymer Degradation and Stability. 2019. V. 165. P. 45–52.
4. Zhang X., Wang C. Smoke suppression mechanisms in PVC composites // Journal of Applied Polymer Science. 2020. V. 137, N 12. P. 118–125
5. Хасанов В.В., Борукаев Т.А., Мусаева Л.А., Кяров А.А. Исследование эффективности использования синтезированного $ZnMoO_4$ в качестве дымогасителя для ПВХ компаундов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 5. С. 66–69.
6. Хасанов В.В., Борукаев Т.А., Кипшиева Т.А., Фотова Д.М. Синтез дымоподавляющих присадок на основе неорганических молибдатов к ПВХ-пластику и исследование их антидымных характеристик // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 4. С. 32–34

References

1. Rabinovich A.M. Polyvinyl chloride and composite materials based on it. Moscow: Khimiya, 2016. 320 pp. (In Russ.).
2. Kuznetsov N.N., Smirnov V.A. Smoke Formation of Polymer Materials. St. Petersburg: Professiya, 2018. 284 p. (In Russ.).
3. Chen J., Li Q. Effect of molybdate compounds on thermal degradation of PVC. *Polymer Degradation and Stability*. 2019;165:45–52.
4. Zhang X., Wang C. Smoke suppression mechanisms in PVC composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020;137(12):118.
5. Khasanov V.V., Borukaev T.A., Musaeva L.A., Kyarov A.A. Study of the effectiveness of using synthesized $ZnMoO_4$ as a smoke suppressant for PVC compounds. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Povolzhya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2018;5:66–69. (In Russ.).
6. Khasanov V.V., Borukaev T.A., Kipshieva T.A., Fotova D.M. Synthesis of smoke-suppressing additives based on inorganic molybdates for PVC plastisol and investigation of their anti-smoke characteristics. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Povolzhya = Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region*. 2016;4:32–34. (In Russ.).

Требования к оформлению научной статьи, представляемой в журнал «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета»

Для публикации в журнале «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета» принимаются статьи на русском или английском языках, содержащие результаты актуальных фундаментальных и прикладных исследований, передовых наукоемких технологий, научных и научно-методических работ.

1. Основные документы, необходимые для публикации

1.1. Один экземпляр статьи в бумажном виде и на электронном носителе отдельным файлом (на диске); на наклейке диска (дискеты) (обязательно!) указываются фамилия автора (авторов) и название статьи.

1.2. Полные сведения об авторе (авторах) на русском и английском языках в бумажном виде и в электронном варианте, оформленном отдельным от статьи файлом, который включает в себя следующие данные:

- фамилия, имя, отчество (полностью) каждого автора;
- место работы (наименование организации), ученая степень, ученое звание, должность каждого автора;
- контактные телефоны, почтовый индекс и адрес, адрес электронной почты (e-mail) каждого автора.

1.3. Сопроводительное письмо на бланке учреждения, где выполнена работа.

1.4. Внешняя рецензия доктора наук (по желанию).

1.5. Акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати – для физико-математических, химических, биологических, технических, экономических наук и науки о земле.

1.6. Справка об учебе в аспирантуре или докторантуре для аспирантов и докторантов.

1.7. «Лицензионный договор» (один на авторский коллектив) в 2-х экз. Без Договора статья не будет опубликована. Текст Договора размещен на сайте журнала «Известия КБГУ».

2. Правила оформления статьи

2.1. Объем статьи – в пределах 10 страниц формата А4, интервал – 1,5, размер шрифта Times New Roman Cyr 14 пт; поля страницы: слева – 3 см, справа – 1 см, сверху – 2,0 см, снизу – 2,5 см.

Краткие сообщения – в пределах 4 машинописных страниц, включающих не более 2 рисунков и 2 таблиц.

2.2. Статья должна включать:

- индекс УДК (универсальная десятичная классификация) в верхнем левом углу;
- название статьи (на русском и английском языках);
- фамилию, имя, отчество автора (авторов) (на русском и английском языках);
- реферат статьи (до 500 знаков) (на русском и английском языках);
- ключевые слова (5–7 слов на русском и английском языках);
- текст статьи, отражающий цель исследования, методы работы, собственно исследования, конкретные выводы;
- литературу (в библиографическом списке нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте; номер источника в тексте указывается в квадратных скобках – автоматическая нумерация ссылок не допускается);

- подпись автора (авторов).

2.3. Иллюстрации к статье (рисунки, фотографии) должны быть черно-белыми, четкими (разрешение не менее 300 dpi, расширение *.jpg) и вставлены в текст. Обычный размер иллюстраций – не более половины листа А4. Формулы и символы помещаются в текст с использованием редактора формул Microsoft Education. Таблицы вставляются в текст; ссылки на рисунки и таблицы обязательны; названия таблиц и подрисуночных подписей обязательны.

2.4. Нумерация страниц обязательна.

2.5. Тип файла в электронном виде – RTF.

Образцы оформления литературы:

книга

Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 210 с.

Интегральные схемы: Принципы конструирования и производства / под ред. А.А. Колосова. М.: Сов. радио, 1989. 280 с.

статья из книги, сборника, журнала

Петренко В.И., Доготь А.Я. Пневмогидравлический кавитационный процесс // Геодинамические основы прогнозирования нефтегазоносности недр: тезисы докладов 1-й Всесоюзной конференции. М., 1988. Ч. 3. С. 616–617.

Хлынов В.А. Общегосударственное планирование рыночной экономики: Опыт Японии // Экономист. 1994. № 4. С. 89–94.

Базаров А.Ж. О некоторых нелокальных краевых задачах для модельных уравнений второго порядка // Известия вузов. Математика. 1990. Т. 2, № 3. С. 11–15.

диссертации и авторефераты диссертаций

Ерков С.А. Формирование художественного восприятия произведений изобразительного искусства на уроках изобразительного искусства в 5, 6 классах средней общеобразовательной школы: дисс... канд. пед. наук. М., 2006. 184 с.

Вахромов Е.Е. Психологические особенности самоактуализации подростков с отклоняющимся поведением: автореф. дисс... канд. психол. наук. М., 2003. 30 с.

патент

Патент РФ № 2102404. Способ получения полиэфиров / В.Н. Тамазина. Опубл. 20.01.1998 г. Бюлл. № 2.

электронный ресурс

Электронный ресурс: Чубыкин А. Российский рынок ПЭТ-пленок // Флексо Плюс. 2004. https://plastinfo.ru/information/news/19255_04.03.2013/

При оформлении иностранной литературы необходимо придерживаться тех же правил, что и для русскоязычных источников. Вместо символа «№» в английском языке ставится буква «N».

При формировании списка литературы необходимо указать не менее 2-х ссылок на статьи из журнала «Известия Кабардино-Балкарского государственного университета».

При несоблюдении указанных правил редакция оставляет за собой право не публиковать статью.

3. Порядок рецензирования

3.1. Рукопись направляется на рецензирование ведущим специалистам в данной области (внешнее и внутреннее рецензирование).

3.2. Результаты рецензирования редакция сообщает автору по электронной почте.

3.2. По результатам рецензирования редколлегия принимает решение о целесообразности опубликования материала, о чем дополнительно сообщается автору.

4. Заявление о конфиденциальности

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных этим журналом, и не будут использованы для каких-либо других целей или предоставлены другим лицам и организациям.

Статьи представляются в редакционно-издательский отдел ИПЦ КБГУ.

Адрес ИПЦ КБГУ: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

Контактный телефон: (8662) 72-23-13.

E-mail: rio@kbsu.ru, izvestia_kbsu@mail.ru. E-mail-адрес защищен от спам-ботов, для его просмотра у вас должен быть включен Javascript.

Ответственный секретарь редакционной коллегии – **Долбин Игорь Викторович**.

После положительного решения редколлегии о публикации статьи в журнале «Известия КБГУ» автор (или авторы) статьи перечисляет на р. сч. КБГУ плату из расчета 400 руб. (в т.ч. НДС) за страницу рукописи.

Назначение платежа: редакционно-издательские услуги («Известия КБГУ»), код дохода 07430201010010000130, разрешение № 0732069510 от 30.03.05 г. пункт 1. В стоимость входят расходы по доставке журнала по территории России. Автор (или авторы) статьи получает 2 экземпляра журнала бесплатно.

Для выкупа дополнительных номеров журнала необходимо передать в редакцию (ИПЦ КБГУ) письмо-заявку с указанием номера и количества экземпляров журнала и перечислить на р. сч. КБГУ плату из расчета 400 руб. (в т.ч. НДС) за один экземпляр журнала с назначением платежа: редакционно-издательские услуги (за журнал «Известия КБГУ»), код дохода 07430201010010000130, разрешение № 0732069510 от 30.03.05 г. пункт 1.

Реквизиты КБГУ для платежей:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова» (КБГУ)

Почтовый и юридический адрес:

360004, Кабардино-Балкарская Республика,

г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173

Телефон: 42-25-60,

Voice/fax: +7(495) 3379955

Телетайп: 257245 «Альфа»

E-mail: yka@kbsu.ru

ОКПО 02069510

ОКОНХ 92110

ОГРН 1020700739234 от 22.07.11 г.

ОКОГУ 13240

ОКАТО 83401000000

ОКЭВД 80.30.1

ОКОПФ 72

ОКФС 12

Банковские реквизиты:

Получатель:

ИНН 0711037537/ КПП 072501001

Отдел № 1 УФК по Кабардино-Балкарской Республике (0401 КБГУ л/с 20046Х17540)

Банк получателя:

ГРКЦ НБ Кабардино-Балкарск. Респ. Банка России

г. Нальчика

БИК 048327001

Р/с 40501810100272000002

КБК 000000000000000000130

Копия платежного документа передается или высылается в редакцию журнала по электронной почте.

Стоимость журнала по подписке, согласно Каталогу «Пресса России», с учетом расходов по доставке журнала по территории России, составляет 450 руб. (в т.ч. НДС).

Копия платежного документа передается или высылается в редакцию журнала по электронной почте.

ИЗВЕСТИЯ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

PROCEEDINGS OF THE KABARDINO-BALKARIAN STATE UNIVERSITY

ТОМ XVI, № 2, 2026

Редактор *Р.М. Шаутаева*
Компьютерная верстка *Е.Л. Шериевой*
Корректор *М.А. Ахматова*

В печать 24.06.2026. Формат 60×84 ¹/₈.
12,55 усл.п.л. 12,0 уч.-изд.л.
Дата выхода в свет 30.06.2026.

Адрес издателя: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет

Печать трафаретная. Бумага офсетная.
Тираж 1000 экз. Заказ № 1209.

Адрес типографии: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173,
Кабардино-Балкарский государственный университет.
Производственно-техническое управление. Полиграфический участок