УДК 541.64 *Оригинальная статья*

Пленочные полимерные носители натрийкарбоксиметилцеллюлозы и поливинилового спирта для иммобилизации наноразмерных кальцийфосфатов

О.Н. Мусская[1], В.К. Крутько[1], V. Aniya[2], Ch.R. Patra[2], Е.Н. Крутько[1], А.Е. Дорошенко[1], И.Е. Глазов[1], Sh. Pant[2], Ch. Batsh[2], H.A. Majeed M[2], P. Nagchowdhury[2], А.И. Кулак[1]

[1]ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

220072, Республика Беларусь, Минск, ул. Сурганова, 9/1

[2]CSIR-Indian Institute of Chemical Technology

500007, India, Telangana, Hyderabad, Uppal Road, Tarnaka

musskaja@igic.bas-net.by

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.887

Аннотация: Изучены особенности формирования интерполимерных комплексов из 0,4-7,0% водных растворов натрийкарбоксиметилцеллюлозы и поливинилового спирта. На основе интерполимерных комплексов натрийкарбоксиметилцеллюлозы/ поливинилового спирта разработаны пленочные полимерные материалы методом полива. Пленочные материалы на основе натрийкарбоксиметилцеллюлозы хорошо растворимы в водных средах с *pH* 5-7 и более гидрофильны по сравнению с поливиниловым спиртом и натрийкарбоксиметилцеллюлозой / поливиниловым спиртом. Показана возможность повышения гидрофобных свойств, а также регулирования степени резорбции пленочных композиционных материалов натрийкарбоксиметилцеллюлозы / поливинилового спирта в зависимости от их состава и термической обработки при 85ºС. Термическим анализом установлено, что наибольшая устойчивость в температурном диапазоне 200-800ºС характерна для образцов натрийкарбоксиметилцеллюлозы и натрийкарбоксиметилцеллюлозы / поливинилового спирта (1:1). Дополнительная обработка при 85ºС в течение 1 часа способствует повышению термической стабильности материалов, однако увеличение продолжительности обработки до 2 часов снижает термоустойчивость образцов. Полученные пленочные материалы являются цитосовместимыми и перспективны в качестве резорбируемых носителей для иммобилизации наноразмерных кальцийфосфатов и других биоактивных компонентов.

Ключевые слова: пленочные полимерные материалы, интерполимерный комплекс, натрийкарбоксиметилцеллюлоза, поливиниловый спирт, кальцийфосфаты.

Мусская Ольга Николаевна – к.х.н., доцент, в.н.с. лаборатории фотохимии и электрохимии, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

Крутько Валентина Константиновна – к.х.н., доцент, заведующий лаборатории фотохимии и электрохимии, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

Aniya Vineet – Ph. D., старший научный сотрудник (ранг Scientist E) отдела химической инженерии и технологических процессов, CSIR-Индийский институт химических технологий

Patra Chitta Ranjan – Ph. D., ведущий научный сотрудник (ранг Scientist G) отдела прикладной биологии, CSIR-Индийский институт химических технологий

Крутько Евгений Николаевич – с.н.с. лаборатории фотохимии и электрохимии, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

Дорошенко Анна Евгеньевна – к.х.н., с.н.с. лаборатории фотохимии и электрохимии, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

Глазов Илья Евгеньевич – к.х.н., с.н.с. лаборатории фотохимии и электрохимии, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

Pant Shubham – Ph. D., научный сотрудник отдела химической инженерии и технологических процессов, CSIR-Индийский институт химических технологий

Batsh Chandramani – научный сотрудник отдела химической инженерии и технологических процессов, CSIR-Индийский институт химических технологий

Majeed M Hanana Abdul – научный сотрудник отдела химической инженерии и технологических процессов, CSIR-Индийский институт химических технологий

Nagchowdhury Proma – научный сотрудник отдела прикладной биологии, CSIR-Индийский институт

© О.Н. Мусская, В.К. Крутько, V. Aniya, Ch.R. Patra, Е.Н. Крутько, А.Е. Дорошенко, И.Е. Глазов, Sh. Pant, Ch. Batsh, H.A. Majeed M, P. Nagchowdhury, А.И. Кулак, 2026

химических технологий
Кулак Анатолий Иосифович – д.х.н., профессор, академик, директор, ГНУ «Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси»

Original paper

Film polymeric carriers of sodium carboxymethylcellulose and polyvinyl alcohol for the immobilization of nanosized calcium phosphates

O.N. Musskaya[1], V.K. Krut'ko[1], V. Aniya[2], Ch.R. Patra[2], E.N. Krutsko[1], A.E. Doroshenko[1], I.E. Glazov[1], Sh. Pant[2], Ch. Batsh[2], H.A. Majeed M[2], P. Nagchowdhury[2], A.I. Kulak[1]
[1]*Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*
[2]*CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, Hyderabad, India*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.887

Abstract The formation features of interpolymer complexes from 0.4-7.0% aqueous solutions of sodium carboxymethyl cellulose and polyvinyl alcohol were studied. Film polymer materials were developed based on the sodium carboxymethyl cellulose / polyvinyl alcohol interpolymer complexes using the casting method. Film materials based on sodium carboxymethyl cellulose are highly soluble in aqueous media with *pH* of 5-7 and are more hydrophilic compared to polyvinyl alcohol and sodium carboxymethyl cellulose / polyvinyl alcohol. The possibility of increasing hydrophobic properties, as well as regulating the degree of resorption of sodium carboxymethyl cellulose / polyvinyl alcohol film composite materials, depending on their composition and heat treatment at 85ºC was demonstrated. Thermal analysis showed that the highest stability in the temperature range of 200–800ºC is characteristic of sodium carboxymethyl cellulose and sodium carboxymethyl cellulose / polyvinyl alcohol (1:1) samples. Additional treatment at 85°C for 1 hour improves the thermal stability of the materials; however, increasing the treatment time to 2 hours reduces the thermal stability of the samples. The resulting film materials are cytocompatible and hold promise as resorbable carriers for the immobilization of nanosized calcium phosphates and other bioactive components.

Keywords: film polymer materials, interpolymer complex, sodium carboxymethylcellulose, polyvinyl alcohol, calcium phosphates.

Olga N. Musskaya – Ph. D., Assistant Professor, Leading Researcher, Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, ORCID: 0000-0002-9821-8969
Valentina K. Krut'ko – Ph. D., Assistant Professor, Head of the Laboratory of Photochemistry and Electrochemistry, Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, ORCID: 0000-0002-1670-207X
Vineet Aniya – Ph. D., Senior Scientist E, Chemical Engineering & Process Technology department, CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, ORCID: 0000-0003- 2446-2894
Chitta Ranjan Patra – Ph. D., Scientist G, Department of Applied Biology, CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, ORCID: 0000-0001-9453-6524
Evgeny N. Krutsko – Senior Researcher, Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, ORCID: 0009-0005-7441-6986
Anna E. Doroshenko – Ph. D., Senior Researcher, Photochemistry and Electrochemistry Laboratory, Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, ORCID: 0009-0003-5034-7272
Ilya E. Glazov – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Photochemistry and Electrochemistry, Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, ORCID: 0000-0003-2183-6715
Shubham Pant – Ph. D., Researcher, Chemical Engineering & Process Technology department, CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, ORCID: 0000-0002-3965-5536
Chandramani Batsh – Researcher, Chemical Engineering & Process Technology department, CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, ORCID: 0009-0003-7383-2326
Hanana Abdul Majeed M – Researcher, Chemical Engineering & Process Technology department, CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, ORCID: 0009-0006-0773-4420
Proma Nagchowdhury – Researcher, Department of Applied Biology, CSIR-Indian Institute of Chemical Technology, ORCID: 0000-0002-0152-5074
Anatoly I. Kulak – Academician, D. Sc., Professor, Director of the Institute of General and Inorganic Chemistry of the NAS of Belarus, ORCID: 0000-0002-1398-3806

Поступила в редакцию/received: 29.07.2026; после рецензирования/revised: 09.09.2026; принята/accepted: 17.09.2026.

1. Введение

Структурные особенности пленочных полимерных материалов обуславливают их широкое практическое применение в медицине в качестве защитных барьерных материалов [1, 2], носителей биоактивных компонентов [3-5], каркасов для клеточных структур [6]. В зависимости от функционального назначения в медицине применяются биосовместимые полимеры различного химического состава [7].

С учетом современных тенденций по использованию экологически безопасного возобновляемого сырья карбоксиметилцеллюлоза и ее соли, в частности, натрийкарбоксиметилцеллюлоза (*Na* -КМЦ), водорастворимые и безопасные полисахариды, перспективны при разработке различных биоматериалов, совместимых с биологическими тканями [1, 8, 9]. Пленки *Na* -КМЦ, модифицированные гликолурилом, обладают хорошими физико-механическими свойствами, не оказывают цитотоксического действия и могут использоваться для предотвращения образования спаек в послеоперационном периоде [1]. Композиты на основе *Na* -КМЦ и поливинилового спирта (ПВС) характеризуются синергетическим действием двух полимеров – улучшенными механическими свойствами, высокой биоразлагаемостью и биосовместимостью. Например, пленочные материалы на основе *Na* -КМЦ и ПВС, содержащие хлоргексидин [5] и наночастицы серебра [9], перспективны в качестве антимикробных покрытий пролонгированного действия.

Ранее нами [10] были разработаны пленочные композиты на основе ПВС и биоактивного наноразмерного кальцийфосфата – гидроксиапатита (ГА), включение которого в полимерную матрицу позволяет добиться как улучшения биосовместимости, так и увеличения прочности образцов. Известно, что кальцийфосфаты могут быть использованы в составе различных биоматериалов (керамики [11], покрытий [12], композитов [13] и др.) для обеспечения эффективной регенерации поврежденных твердых тканей. Целью данной работы являлась разработка пленочных полимерных носителей на основе *Na* -КМЦ и ПВС для иммобилизации наноразмерных кальцийфосфатов.

2. Материалы и методы

В качестве полимеров использовали *Na* -КМЦ (15–50 мПа·с для 4% раствора) и ПВС (марки 11/2 высшего сорта и 16/1 первого сорта; CAS 9002-89-5, *Mr* 72000), на основе которых готовили 3-7% водные растворы. Пленочные полимерные носители получали методом полива 7% растворов *Na* -КМЦ и ПВС (*Mr* 72000 г/моль) при объемных соотношениях 1:(0,3–3,0) с 1,5 об.% глицерина. Введение наноразмерного кальцийфосфата в полимерный носитель осуществляли путем смешивания 7% раствора *Na* -КМЦ/ПВС (1:1), содержащего 1,5 об.% глицерина, и 3% геля ГА при их

объемных соотношениях 1:(0,1-2,0), что соответствует 3-44% кальцийфосфата в высушенной пленке. Растворы полимеров либо их смеси с гелем ГА наносили на стеклянную поверхность в количестве 80-230 мкл/см^2, высушивали при комнатной температуре в течение 1-2 суток, затем дополнительно часть образцов выдерживали при 85°С в течение 1-2 часов. Наноразмерный кальцийфосфат получали в виде геля ГА жидкофазным синтезом согласно [14].

Оптические свойства образцов изучали с помощью спектрофотометра Agilent 8453 (США) с последовательным разбавлением концентрированных растворов полимеров. Гидрофильно-гидрофобные свойства пленочных материалов оценивали методом лежащей капли [15] с использованием дистиллированной воды в качестве смачивающей жидкости. Термогравиметрию (ТГ) и дифференциальный термический анализ (ДТА) образцов осуществляли в воздушной среде на совмещенном термическом анализаторе NETZSCH STA 409 PC LUXX (Германия); скорость нагрева составляла 5°С/мин, масса навески – 14-32 мг.

Оценку цитотоксичности пленочных материалов проводили *in vitro* МТТ-анализом, используя клеточную линию HEK 293 (Human Embryonic Kidney), предоставленную Национальным центром клеточных наук (NCCS, Индия) согласно методикам [16, 17]. Культивирование проводили в модифицированной среде Игла Дульбекко (HiMedia, Индия) во влажном инкубаторе с 5% CO_2 при 37°С в течение 24-48 часов.

3. Результаты и обсуждение

Спектры 7% растворов полимеров (особенно в случае *Na* -КМЦ) характеризуются высоким поглощением. При разбавлении растворов до 0,4-3,0% на спектрах появляются максимумы поглощения в области 200-400 нм (см. рис. 1), что обусловлено электронными переходами в полимерных цепях. Более заметное поглощение в случае ПВС связано с наличием остаточных и концевых ацетатных групп [10, 18]. Следует отметить, что оптический спектр раствора ПВС марки 16/1 характеризуется значительным усилением эффектов светорассеяния даже при небольших концентрациях полимера (1,5%).

Смешивание растворов *Na* -КМЦ и ПВС при различных соотношениях приводит к небольшому уменьшению прозрачности растворов, что может свидетельствовать об образовании интерполимерных комплексов. В случае разбавленных растворов, например, на спектрах 0,8% растворов *Na* -КМЦ / ПВС не обнаруживается областей поглощения, характерных для индивидуальных полимеров (см. рис. 2, спектры 3-7), однако появляется полоса поглощения с максимумом при 272 нм при соотношениях *Na* -КМЦ / ПВС 1:1 и 1:2. Смещение данной полосы в коротковолновую область (гипсохромный сдвиг) по сравнению с

индивидуальным ПВС позволяет предположить значительное влияние концевых ацетатных групп, участвующих в образовании интерполимерных комплексов *Na* -КМЦ / ПВС. Нагревание растворов полимеров при 60°С сопровождается изменением интенсивности максимумов поглощения, что свидетельствует об изменении структуры интерполимерного комплекса *Na* -КМЦ / ПВС. В случае повышения содержания *Na* -КМЦ, а также при использовании ПВС марки 11/2 на спектрах отмечается незначительное поглощение в области 200-400 нм (см. рис. 3).

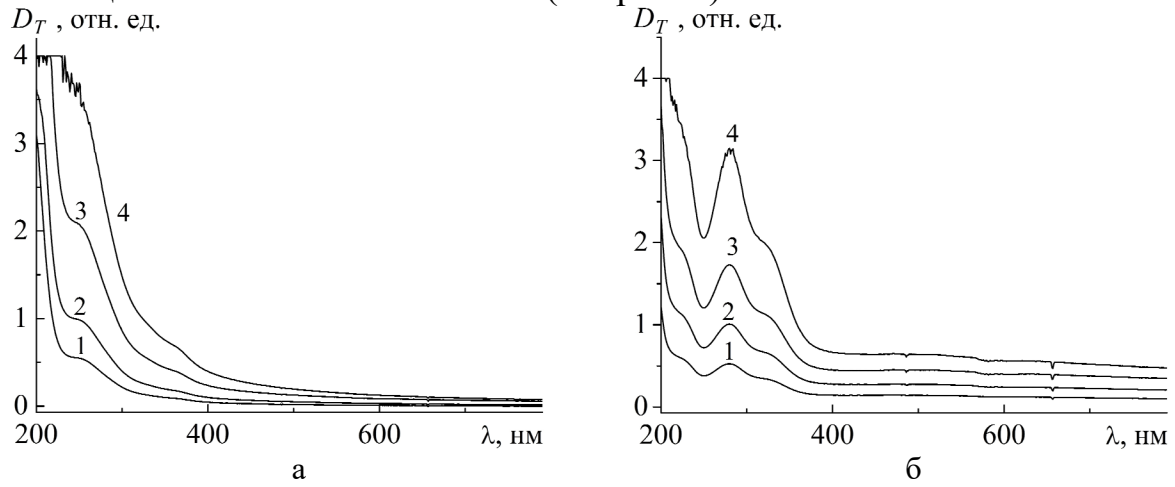


Рис. 1. Спектры поглощения растворов *Na* -КМЦ (а) и ПВС с *Mr* 72000 (б) различной концентрации: 1 – 0,4%; 2 – 0,8%; 3 – 1,5%; 4 – 3,0%.

Пленочные материалы на основе *Na* -КМЦ хорошо растворимы в водных средах с *pH* 5-7 и более гидрофильны по сравнению с ПВС и *Na* -КМЦ / ПВС. Дополнительное выдерживание пленочных полимерных материалов при 85°С приводит к структурированию полимеров и снижению гидрофильности их поверхности особенно с увеличением продолжительности прогрева до 2 часов. Согласно данным ТГ (см. рис. 4 а) потеря массы пленок на основе индивидуального *Na* -КМЦ при нагревании до 800°С происходит в несколько стадий, на которых основные процессы протекают в температурных диапазонах 20-180°С, 200-300°С, 300-500°С и 620-700°С. В случае ПВС на кривых ТГ (см. рис. 4 б) можно выделить две основные стадии при 20-180°С и 200-530°С (включает несколько этапов). Первая стадия в обоих случаях связана с дегидратацией образцов и стеклованием полимера [19, 20], что сопровождается небольшими потерями массы (6-8%) и эндоэффектами с экстремумами при 74°С (*Na* -КМЦ) и 85°С (ПВС) на кривых ДТА. На следующих стадиях происходит деструкция полимеров, сопровождающаяся практически полным выгоранием образцов в случае ПВС в отличие от *Na* -КМЦ (сухой остаток составляет 15% от массы исходного образца). Деструкция образцов на основе исходных полимеров сопровождается экзоэффектами, которые в случае *Na* -КМЦ более выражены с экстремумами при 280°С,

600°C, 640°C и 680°C, а для пленочных материалов, полученных на основе водных растворов ПВС различной концентрации (5 и 7%), экстремумы менее выражены и наблюдаются при 430°C, 490°C (основной) и 580°C.

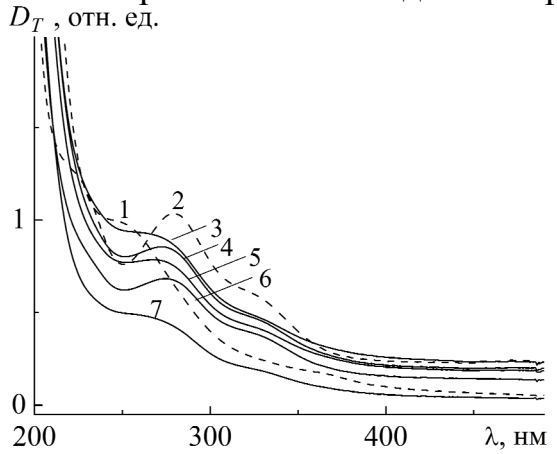


Рис. 2. Спектры поглощения 0,8% растворов *Na* -КМЦ и ПВС с *Mr* 72000, полученных разбавлением 3% растворов полимеров: 1 – *Na* -КМЦ; 2 – ПВС; 3 – *Na* -КМЦ / ПВС 1:1; 4 – *Na* -КМЦ / ПВС 1:1; 5 – *Na* -КМЦ / ПВС 1:1, 60ºС; 6 – *Na* -КМЦ / ПВС 1:2; 7 – *Na* -КМЦ / ПВС 2:1.

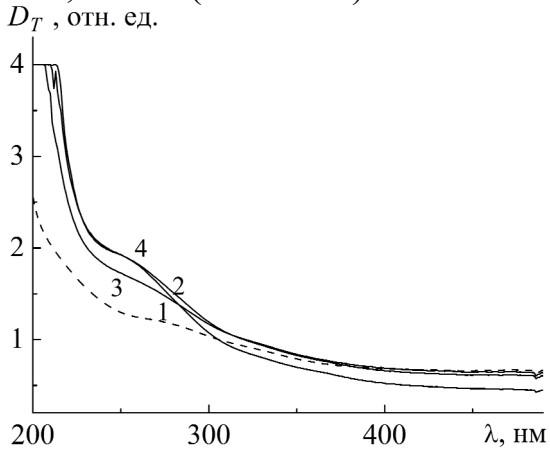
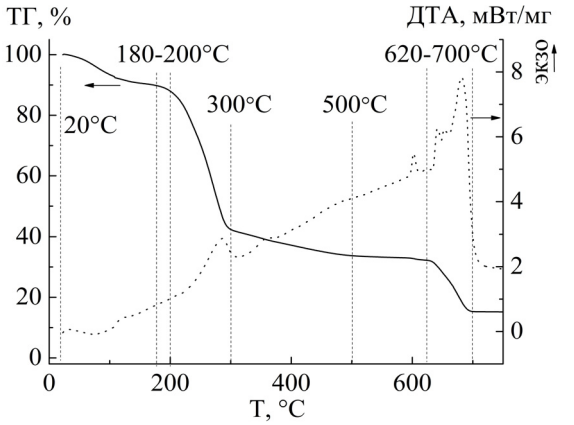
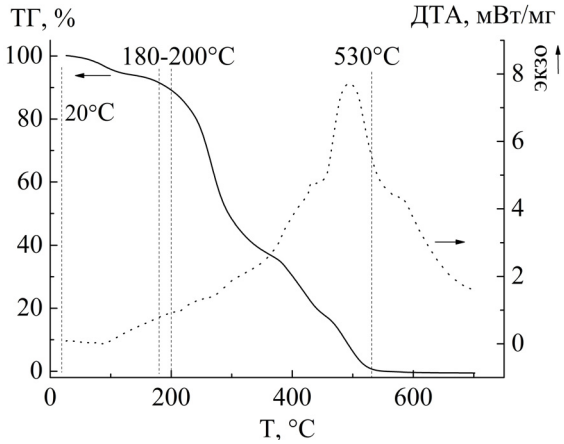


Рис. 3. Спектры поглощения 1,5% растворов ПВС (марка 11/2) и *Na* -КМЦ / ПВС, полученных разбавлением 3% растворов полимеров: 1 – ПВС; 2 – *Na* -КМЦ / ПВС 1:1; 3 – *Na* -КМЦ / ПВС 1:2; 4 – *Na* -КМЦ / ПВС 2:1.



а



б

Рис. 4. ТГ и ДТА кривые пленочных носителей, полученных на основе 7% водного раствора *Na* -КМЦ (а) и ПВС (б).

В случае пленочных полимерных материалов *Na* -КМЦ / ПВС на первой стадии (20-100°C) потеря массы образцов сопоставима, как для материалов, полученных на основе растворов *Na* -КМЦ. Кроме того, образцы полностью не выгорают: сухой остаток составляет 6-12% от массы исходного образца и минимален при большем содержании ПВС. Однако экзоэффекты в области 350-700°C в пленочных полимерных материалах на основе *Na* -КМЦ / ПВС смещены в область более низких температур по сравнению с образцами на основе *Na* -КМЦ, при этом

термическая устойчивость выше в случае большего содержания ПВС (соотношение *Na* -КМЦ / ПВС 1:1).

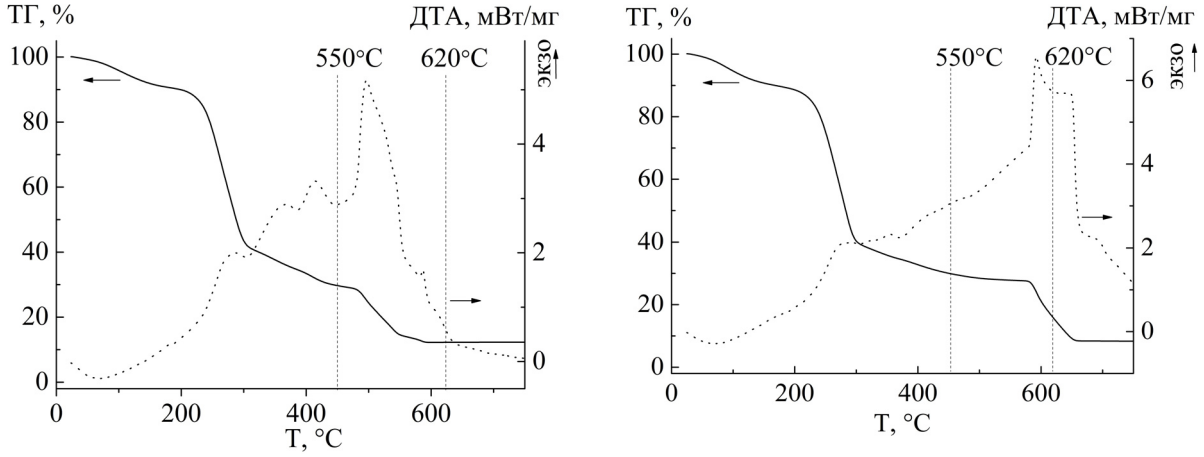


Рис. 5. ТГ и ДТА кривые пленочных носителей, полученных на основе интерполимерных комплексов *Na* -КМЦ/ПВС 1:0,4 после высушивания при комнатной температуре (а) и дополнительной обработки при 85°С в течение 1 часа (б).

Дополнительная обработка при 85°С в течение 1 часа способствует повышению термической стабильности пленочных полимерных носителей при 450-620°С (см. рис. 5), что сопровождается формированием более кристаллической структуры полимера и повышением гидрофобности образцов. Увеличение продолжительности обработки до 2 часов способствует снижению термоустойчивости материалов, вероятно, за счет усиления в полимерной цепи внутренних напряжений, приводящих к возникновению дефектов вследствие замедления подвижности и релаксации макроцепей.

Введение наноразмерных кальцийфосфатов в матрицу полимерного носителя сопровождается структурно-фазовыми трансформациями макромолекул и приводит к упрочнению, снижению эластичности и менее выраженной гидрофильности образцов. Термическая стабильность таких материалов с наноразмерными кальцийфосфатами повышается, что проявляется в смещении основных температурных эффектов на ДТА в высокотемпературную область. Следует отметить, что при большом содержании кальцийфосфатов (выше 10%) образцы становятся хрупкими.

Пленочные полимерные носители КМЦ / ПВС и материалы на их основе с наноразмерными кальцийфосфатами не проявляют значительной токсичности для клеточной линии HEK 293 в течение 24 и 48 часов. Кроме того, для всех пленочных полимерных материалов отмечается незначительное размножение клеток по сравнению с контрольными образцами. Таким образом, оценка *in vitro* свидетельствует о цитосовместимости полученных пленочных полимерных материалов и перспективности их будущего терапевтического применения.

4. Заключение

Методом полива на основе интерполимерных комплексов *Na*-КМЦ / ПВС разработаны водорастворимые пленочные полимерные носители для биоактивных компонентов. В зависимости от состава и дополнительной термической обработки можно регулировать физико-химические и функциональные свойства таких материалов. Иммобилизация наноразмерных кальцийфосфатов в полимерную матрицу перспективна при разработке защитных барьерных материалов для регенерации твердых тканей.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ «Химические процессы и технологии» на 2026–2030 гг. по заданию 2.1.04.3, грантов БРФФИ (Т25ИНДА-001) и CSIR (IST 552503).

Библиографический список:

1. **Бакибаев, А.А.** Противоспаечное действие композиционных пленочных материалов на основе модифицированной гликолурилом натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы / А.А. Бакибаев, В.П. Тугульдурова, М.В. Ляпунова и др. // Современные технологии в медицине. – 2021. – Т. 13. – № 1. – С. 35-41. DOI: 10.17691/stm2021.13.1.04.

2. **Fazel Anvari-Yazdi, A.** Biomaterials in postoperative adhesion barriers and uterine tissue engineering A. Fazel Anvari-Yazdi, I. Badea, X. Chen // Gels. – 2025. – V. 11. – I. 6. – Art. № 441. – 51 p. DOI: 10.3390/gels11060441.

3. **Мударисова, Р.Х.** Полимерные глазные пленки на основе поливинилового спирта и арабиногалактана с левофлоксацином / Р.Х. Мударисова, Л.А.Бадыкова, Г.А.Азаматова и др. // Журнал прикладной химии. –2013. – Т. 86. – № 4. – С. 650-654.

4. **Ерофеева, Л.Н.** Исследования кафедры фармацевтической технологии по разработке полимерных лекарственных пленок / Л.Н. Ерофеева, Т.А. Панкрушева, М.С. Чекмарева и др. // Медицинская наука и образование Урала. – 2017. – № 4. – С. 179-183.

5. **Гущин, Н.А.** Полимерные пленочные антимикробные композиты медицинского назначения / Н.А. Гущин, Г.У. Островидова, Е.А. Соснов // Журнал прикладной химии. – 2008. – Т. 81. – № 1. – С. 132-135.

6. **Kalita, H.** Fabrication and characterization of polyvinyl alcohol/metal (Ca, Mg, Ti) doped zirconium phosphate nanocomposite films for scaffold-guided tissue engineering application / H. Kalita, P. Pal, S. Dhara, A. Pathak // Materials Science and Engineering C. – 2017. – V. 71. – P. 363-371. DOI: 10.1016/j.msec.2016.09.063.

7. **Kesharwani, R.** Polymer based biofilms: development and clinical application in medical science / R. Kesharwani, R. Yadav et al. // Biomedical Materials & Devices. – 2024. – V. 2. – P. 275-287. DOI: 10.1007/s44174-023-00114-8.

8. **Thambirajoo, M.** Functionalised sodium–carboxymethylcellulose–collagen bioactive bilayer as an acellular skin substitute for future use in diabetic wound management: the evaluation of physicochemical, cell viability, and antibacterial effects / M. Thambirajoo, N.I. Md Fadilah, M. Maarof et al. // Polymers. – 2024. – V. 16. – I. 16. – Art. № 2252. – 27 p. DOI: 10.3390/polym16162252.

9. **Yunusov, K.E.** Advances in the formation and properties of nanofiber biomaterials from polyvinyl alcohol/carboxymethylcellulose/nanosilver systems for medical applications / K.E. Yunusov, M.M. Mirkholisov, M.A. Azizova et al. // Chemical Review and Letters. – 2025. – V. 8. – P. 20-38. DOI: 10.22034/crl.2024.473962.1409.

10. **Мусская, О.Н.** Пленочные композиты на основе гидроксиапатита и поливинилового спирта / О.Н. Мусская, В.К. Крутько, А.И. Кулак, Ю.А. Лесникович // Полимерные материалы и технологии. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 28-33. DOI: 10.32864/polymmattech-2017-3-2-28-33.

11. **Крутько, В.К.** Термическая эволюция кальцийфосфатной пенокерамики, полученной на основе гидроксиапатита и монокальцийфосфата моногидрата / В.К. Крутько, О.Н. Мусская, А.И. Кулак, Т.В. Сафронова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 615-623. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.615.

12. **Скачков, В.М.** Разработка материала на основе гидроксиапатита и алюмосиликатных цеолитов со связующим агентом для формирования биоактивных покрытий / В.М. Скачков, Е.А. Богданова, С.А. Бибанаева, А.Г. Широкова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 1004-1015. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.1004.
13. **Глазов, И.Е.** Осаждение гибридных нанокомпозитов гидроксиапатит / аутофибрин в слабощелочной среде / И.Е. Глазов, В.К. Крутько, Р.А. Власов и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 818-828. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.818.
14. **Глазов, И.Е.** Апатитные фосфаты кальция: жидкофазное формирование, термические превращения, терминология и идентификация / И.Е. Глазов, В.К. Крутько, О.Н. Мусская, А.И. Кулак // Журнал неорганической химии. – 2022. – Т. 67. – № 2. – С. 193-202. DOI: 10.31857/S0044457X22020040.
15. **Stalder, A.F.** Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops / A.F. Stalder, T. Melchior, M. Müller et al. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2010. – V. 364. – I. 1-3. – P. 72-81. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.04.040.
16. **Londhe, S.** Silver nitroprusside nanoparticles for breast cancer therapy: in vitro and in vivo approach / S. Londhe, S. Haque, S. Tripathy et al. // Nanoscale. – 2023. – V. 15. – I. 23. – P. 10017-10032. DOI: 10.1039/d3nr00221g.
17. **Julappagari, M.** Gold nanoparticles-based targeted delivery of rapamycin and Olaparib to breast cancer: an in vitro and in vivo approach / M. Julappagari, S. Haque, S. Tripathy et al. // Bioorganic Chemistry. – 2025. – V. 158. – Art. № 108322. – 20 p. DOI: 10.1016/j.bioorg.2025.108322.
18. **Лихоманова, С.В.** Механизмы взаимодействия молекул поливинилового спирта и углеродных наночастиц в водных растворах / С.В. Лихоманова, Н.В. Каманина // Прикладная физика. – 2025. – № 1. – С. 78-83. DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-78-83.
19. **Rault, J.** Glass transition temperature regulation effect in a poly(vinyl alcohol)-water system / J. Rault, R. Gref, Z.H. Ping et al. // Polymer.– 1995. – V.36. – I.8. – P. 1655-1661. DOI: 10.1016/0032-3861(95)99011-I.
20. **Tan, L**. Effect of Na^+ and Ca^{2+} on the thermal degradation of carboxymethylcellulose in air / L. Tan, R. Shi, Q. Ji et al. // Polymers & Polymer Composites. – 2017. – V. 25. – I. 4. – P. 309-314. DOI: 10.1177/096739111702500408.

References:

1. Bakibaev A.A., Tuguldurova V.P., Lyapunova M.V. Protivospayechnoye deystviye kompozitsionnykh plenochnykh materialov na osnove modifitsirovannoy glikolurilom natriyevoy soli karboksimetiltsellyulozy [Anti-adhesion effect of composite film materials based on glycoluril-modified sodium carboxymethyl cellulose], *Sovremennye tehnologii v medicine [Modern Technologies in Medicine]*, 2021, vol. 13, no. 1, pp. 35-41. DOI: 10.17691/stm2021.13.1.04. (In Russian).
2. Fazel Anvari-Yazdi A., Badea I., Chen X. Biomaterials in postoperative adhesion barriers and uterine tissue engineering, *Gels*, 2025, vol. 11, issue 6, art. no. 441, 51 p. DOI: 10.3390/gels11060441.
3. Mudarisova R.K., Badykova L.A., Azamatova G.A. et al. Polymeric eye films based on polyvinyl alcohol and arabinogalactan with levofloxacin, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2013, vol. 86, issue 4, pp. 606-610. DOI: 10.1134/S1070427213040289.
4. Erofeeva L.N., Pankrusheva T.A., Chekmareva M.S. et al. Issledovaniya kafedry farmatsevticheskoy tekhnologii po razrabotke polimernykh lekarstvennykh plenok [Research by the department of pharmaceutical technology on the development of polymer medicinal films], *Meditsinskaya nauka i obrazovaniye [Urala Medical Science and Education of Ural]*, 2017, no. 4, pp 179-183. (In Russian).
5. Gushchin N.A., Ostrovidova G.U., Sosnov E.A. Antimicrobial polymeric composite films for medical use, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2008, vol. 81, issue 1, pp. 128-130.
6. Kalita H., Pal P., Dhara S., Pathak A. Fabrication and characterization of polyvinyl alcohol/metal (Ca, Mg, Ti) doped zirconium phosphate nanocomposite films for scaffold-guided tissue engineering application, *Materials Science and Engineering C*, 2017, vol. 71, pp. 363-371. DOI: 10.1016/j.msec.2016.09.063.
7. Kesharwani R., Yadav R. et al. Polymer based biofilms: development and clinical application in medical science, *Biomedical Materials & Devices*, 2024, vol. 2, pp. 275-287. DOI: 10.1007/s44174-023-00114-8.
8. Thambirajoo M., Md Fadilah N.I., Maarof M. et al. Functionalised sodium–carboxymethylcellulose–collagen bioactive bilayer as an acellular skin substitute for future use in diabetic wound management: the evaluation of physicochemical, cell viability, and antibacterial effects, *Polymers*, 2024, vol. 16, issue 16, art. no. 2252, 27 p. DOI: 10.3390/polym16162252.
9. Yunusov K.E., Mirkholisov M.M., Azizova M.A. et al. Advances in the formation and properties of nanofiber biomaterials from polyvinyl alcohol/carboxymethylcellulose/nanosilver systems for medical applications,

Chemical Review and Letters, 2025, vol. 8, pp. 20-38. DOI: 10.22034/crl.2024.473962.1409.
10. Musskaya O.N., Krut'ko V.K., Kulak A.I., Lesnikovich Yu.A. Plenochnyye kompozity na osnove gidroksiapatita i polivinilovogo spirta [Film composites based on polyvinyl alcohol and hydroxyapatite], *Polimernyye materialy i tekhnologii [Polymer Materials and Technologies],* 2017, vol. 3, no. 2, pp. 28-33. DOI: 10.32864/polymmattech-2017-3-2-28-33. (In Russian).
11. Krut'ko V.K., Musskaya O.N., Kulak A.I., Safronova T.V. Termicheskaya evolyutsiya kal'tsiyfosfatnoy penokeramiki, poluchennoy na osnove gidroksiapatita i monokal'tsiyfosfata monogidrata [Thermal evolution of calcium phosphate foam ceramics obtained on the basis of hydroxyapatite and monocalcium phosphate of monohydrate], *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 615-623. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.615. (In Russian).
12. Skachkov V.M., Bogdanova E.A., Bibanaeva S.A., Shirokova A.G. Razrabotka materiala na osnove gidroksiapatita i alyumosilikatnykh tseolitov so svyazuyushchim agentom dlya bioformirovaniya pokrytiy [Development of a material based on hydroxyapatite and aluminosilicate zeolites with a binding agent for the formation of bioactive coatings], *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2024, issue 16, pp. 1004-1015. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.1004. (In Russian).
13. Glazov I.E., Krut'ko V.K., Vlasov R.A. Osazhdeniye gibridnykh nanokompozitov gidroksiapatit/autofibrin v slaboshchelochnoy srede [Precipitation of hybrid hydroxyapatite / autofibrin nanocomposites], *Fiziko-himicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2021, issue 13, pp. C. 818-828. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.818. (In Russian).
14. Glazov I.E., Krut'ko V.K., Musskaya O.N., Kulak A.I. Calcium phosphate apatites: wet formation, thermal transformations, terminology, and identification, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, issue 2, pp. 173-182. DOI: 10.1134/S0036023622020048.
15. Stalder A.F., Melchior T., Müller M. et al. Low-bond axisymmetric drop shape analysis for surface tension and contact angle measurements of sessile drops, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, vol. 364, issue 1-3, pp. 72-81. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2010.04.040.
16. Londhe S., Haque S., Tripathy S. et al. Silver nitroprusside nanoparticles for breast cancer therapy: in vitro and in vivo approach, *Nanoscale*, 2023, vol. 15, issue 23, pp. 10017-10032. DOI: 10.1039/d3nr00221g.
17. Julappagari M., Haque S., Tripathy S. et al. Gold nanoparticles-based targeted delivery of rapamycin and Olaparib to breast cancer: An in vitro and in vivo approach, *Bioorganic Chemistry*, 2025, vol. 158, art. no. 108322, 20 p. DOI: 10.1016/j.bioorg.2025.108322.
18. Likhomanova S.V., Kamanina N.V. Mekhanizmy vzaimodeystviya molekul polivinilovogo spirta i uglerodnykh nanochastits v vodnykh rastvorakh [Interaction mechanisms of polyvinyl alcohol molecules with carbon nanoparticles in aqueous solutions], *Prikladnaya fizika [Applied Physics],* 2025, no. 1, pp. 78-83. DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-78-83. (In Russian).
19. Rault J., Gref R., Ping Z.H. et al. Glass transition temperature regulation effect in a poly(vinyl alcohol)-water system, *Polymer*, 1995, vol. 36, issue 8, pp. 1655-1661. DOI: 10.1016/0032-3861(95)99011-I.
20. Tan L., Shi R., Ji Q.et al. Effect of Na^{+} and Ca^{2+} on the thermal degradation of carboxymethylcellulose in air, *Polymers & Polymer Composites*, 2017, vol. 25, issue 4, pp. 309-314. DOI: 10.1177/096739111702500408.