

УДК 547.458.88:543.42

<https://doi.org/10.70769/2181-4732.ITJ.2026-m.06>

АМФОТЕРНЫЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАРБОКСИМЕТИЛХИТОЗАНА, ПОЛУЧЕННОГО ИЗ ОТХОДОВ ШЕЛКОВОДСТВА (ТИВИТ)

Ашуров Муродулло Холбоевич¹ – доцент, E-mail: ashurov82mx@gmail.com,

ORCID: 0009-0003-3048-9345, Science ID: PQD-0226-0010;

Нурмонов Алишер Аслиддин угли² – инженер, E-mail: alishernurmonov3100@gmail.com,

ORCID: 0009-0001-8487-2708, Science ID: FNV-0526-0063;

Асранова Умида Хамиджон кизи³ – ассистент, E-mail: asranovaumida23@gmail.com,

ORCID: 0009-0006-2595-9877, Science ID: MAN-0326-0035;

Балтаева Умида Рузимбаевна⁴ – докторант (PhD), E-mail: baltayevaumida31@gmail.com,

ORCID: 0009-0002-1340-5085, Science ID: FXR-0426-0060;

Азимов Сайдулло Хамидович⁵ – руководитель центра,

E-mail: saydullo_84@mail.ru, ORCID: 0009-0005-8802-9848, Science ID: DAN-0526-0016.

¹Каршинский государственный технический университет, г. Карши, Узбекистан

²АО «Navoiyazot», г. Навои, Узбекистан

³Андижанский государственный технический институт, г. Андижан, Узбекистан

⁴Национальный университет Узбекистана, г. Ташкент, Узбекистан

⁵Научно-образовательный центр «NEFTGAZ-MALAKA», АО «O'ZLITINEFTGAZ», г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. В статье приведены результаты исследования кислотно-основных и амфотерных свойств карбоксиметилхитозана (КМХ), синтезированного из отходов шелководства (тивит), а также оценено его термическая стабильность. КМХ получали из тивита через стадии выделения хитина, деацетилирования и карбоксиметилирования. Степень замещения $DS = 0,67$ (потенциометрическое титрование). Амфотерность исследовали потенциометрическим титрованием (определение pK_{a1} и pK_{a2}), измерением растворимости в диапазоне pH 4-10 и ζ -потенциала (электрофоретическое светорассеяние). Термическую стабильность изучали методами TGA/DSC в инертной атмосфере (N_2 , 30-600 °C, 10 °C/мин). Структуру подтверждали FTIR и элементным анализом. Потенциометрическое титрование выявило две константы диссоциации: $pK_{a1}=3,2 \pm 0,1$ (карбоксильная группа) и $pK_{a2}=6,8 \pm 0,1$ (аминогруппа). Изoeлектрическая точка $pI=5,0$. Растворимость КМХ минимальна при pH 5,0 (42%) и превышает 95% при $pH > 7,0$. ζ -потенциал изменяется с +25 мВ (pH 3,0) до -25 мВ (pH 9,0), что обеспечивает коллоидную стабильность ($|\zeta| > 20$ мВ). TGA показала: $T_{onset}=232$ °C, $T_{max}=298$ °C, остаток при 600 °C – 23% (карбонизованный углерод). DSC выявила эндотермический пик при 85 °C и экзотермические пики при 302 °C и 450 °C. КМХ из тивита обладает ярко выраженными амфотерными свойствами с изoeлектрической точкой при pH 5,0. Термическая стабильность достаточна для применения в буровых растворах (до 150°C) и биомедицинских материалах. Результаты обосновывают использование КМХ в качестве pH-чувствительного и термостойкого полимера.

Ключевые слова: карбоксиметилхитозан; тивит; амфотерный полимер; pK_a ; ζ -потенциал; TGA/DSC; термическая стабильность.

УДК 547.458.88:543.42

IPAKCHILIK CHIQINDILARIDAN (TIVIT) OLINGAN KARBOKSIMETILXITOZANNING AMFOTER VA TERMIK XUSUSIYATLARI

Ashurov Murodullo Xolboyevich¹ – dotsent;

Nurmonov Alisher Asliddin o'g'li² – muhandis;

Asranova Umida Xamidjon qizi³ - assistent;

Baltayeva Umida Ruzimbayevna⁴ - doktorant (PhD);

Azimov Saydullo Xamidovich⁵ - markaz rahbari.

¹Qarshi davlat texnika universiteti, Qarshi sh., O'zbekiston

²Navoiyazot" AJ muhandisi, Navoiy sh., O'zbekiston

³Andijon davlat texnika instituti, Andijon sh., O'zbekiston

⁴O'zbekiston Milliy universiteti, Toshkent sh., O'zbekiston

⁵"NEFTGAZ-MALAKA" ilmiy-ta'lim markazi rahbari, "O'ZLITINEFTGAZ" AJ,
Toshkent sh., O'zbekiston

Annotatsiya. Ushbu maqolada ipakchilik chiqindilaridan (tivit) sintez qilingan karboksimetilxitozanning (KMX) kislota-asos va amfoter xususiyatlarini o'rganish, shuningdek uning termik barqarorligini baholash tadqiqot natijalari keltirilgan. KMX tivitdan xitin ajratish, deasetillash va karboksimetillash bosqichlari orqali olindi. O'rin bosish darajasi $DS=0,67$ (potensiometrik titrlash). Amfoterlik potensiometrik titrlash (pK_{a1} va pK_{a2} ni aniqlash), pH 4-10 oralig'ida eruvchanlik va ζ -potentsial (elektroforetik yorug'lik sochilishi) yordamida o'rganildi. Termik barqarorlik TGA/DSC usullari bilan inert atmosferada (N_2 , 30-600°C, 10°C/min) baholandi. Tuzilish FTIR va elementar tahlil bilan tasdiqlandi. Potensiometrik titrlash ikkita dissotsiatsiya konstantasini aniqladi: $pK_{a1}=3,2\pm0,1$ (karboksil guruhi) va $pK_{a2}=6,8\pm0,1$ (aminoguruh). Izoelektrik nuqta $pI = 5,0$. KMX ning eruvchanligi pH 5,0 da minimal (42%) va pH >7,0 da 95% dan yuqori. ζ -potentsial +25 mV (pH 3,0) dan -25 mV (pH 9,0) gacha o'zgaradi, bu kolloid barqarorlikni ta'minlaydi ($|\zeta| > 20$ mV). TGA natijalari: $T_{boshl} = 232$ °C, $T_{max} = 298$ °C, 600 °C da qoldiq 23% (karbonizatsiyalangan uglerod). DSC yordamida 85 °C da endotermik cho'qqi hamda 302 °C va 450 °C da ekzotermik cho'qqilar aniqlandi. Tivitdan olingan KMX pH 5,0 da izoelektrik nuqtaga ega bo'lgan aniq amfoter xususiyatlarga ega. Termik barqarorlik burg'ulash eritmalarida (150 °C gacha) va biotibbiyot materiallarida qo'llash uchun yetarli. Natijalar KMX ni pH-sezgir va termik chidamli polimer sifatida ishlatishni asoslaydi.

Kalit so'zlar: karboksimetilxitozan; tivit; amfoter polimer; pK_a ; ζ -potentsial; TGA/DSC; termik barqarorlik.

УДК 547.458.88:543.42

AMPHOTERIC AND THERMAL PROPERTIES OF CARBOXYMETHYLCHITOSAN DERIVED FROM SILK INDUSTRY WASTE (TIVIT)

Ashurov, Murodullo¹ -Associate professor;

Nurmonov, Alisher² - Engineer;

Asranova, Umida³ - Assistant;

Baltayeva, Umida⁴ - Doctoral student (PhD);

Azimov, Saydullo⁵ - Head of the Center.

¹Karshi state technical university, Karshi city, Uzbekistan

²JSC "Navoiyazot", Navoi city, Uzbekistan

³Andijan state technical institute, Andijan city, Uzbekistan

⁴National university of Uzbekistan, Tashkent city, Uzbekistan

⁵"NEFTGAZ-MALAKA", JSC "UZLITINEFTGAS", Tashkent city, Uzbekistan

Abstract. To investigate the acid-base and amphoteric properties of carboxymethylchitosan (CMCh) synthesized from silk industry waste (tivit), as well as to evaluate its thermal stability. CMCh was obtained from tivit through chitin extraction, deacetylation and carboxymethylation steps. The degree of substitution was $DS = 0.67$ (potentiometric titration). Amphoterism was studied by potentiometric titration (determination of pK_{a1} and pK_{a2}), solubility measurement in the pH range 4-10, and ζ -potential (electrophoretic light scattering). Thermal stability was studied by TGA/DSC in an inert atmosphere (N_2 , 30-600 °C, 10 °C/min). Structure was confirmed by FTIR and elemental analysis. Potentiometric titration revealed two dissociation constants: $pK_{a1} = 3.2 \pm 0.1$ (carboxyl group) and $pK_{a2} = 6.8 \pm 0.1$ (amino group). The isoelectric point was $pI = 5.0$. CMCh solubility was minimal at pH 5.0 (42%) and exceeded 95% at pH > 7.0. ζ -potential changed from +25 mV (pH 3.0) to -25 mV (pH 9.0), ensuring colloidal stability ($|\zeta| > 20$ mV). TGA showed $T_{onset} = 232$ °C, $T_{max} =$

298 °C, and a residue of 23% at 600 °C (carbonized matter). DSC revealed an endothermic peak at 85 °C and exothermic peaks at 302 °C and 450 °C. CMCh from tivit exhibits pronounced amphoteric properties with an isoelectric point at pH 5.0. Thermal stability is sufficient for use in drilling fluids (up to 150°C) and biomedical materials. The results justify the use of CMCh as a pH-sensitive and heat-resistant polymer.

Keywords: carboxymethylchitosan; tivit; amphoteric polymer; pK_a ; ζ -potential; TGA/DSC; thermal stability.

Введение

Хитозан - природный катионный полимер, получаемый частичным деацетилизацией хитина, - занимает ведущее место среди биополимеров благодаря уникальному сочетанию биосовместимости, биodeградируемости, нетоксичности и антимикробной активности. Это обуславливает его широкое применение в биомедицине (ранозаживляющие покрытия, системы доставки лекарств), пищевой промышленности (съедобные плёнки), сельском хозяйстве (стимуляторы роста растений) и нефтегазовой отрасли (реагенты для буровых растворов) [1-3]. Однако практическое использование немодифицированного хитозана в водных средах при pH выше 6,5 ограничено из-за депротонирования аминогрупп, что ведёт к потере растворимости и выпадению полимера в осадок [4].

Для преодоления этого недостатка применяют химическую модификацию, в частности карбоксиметилирование, которое вводит в макромолекулу анионные карбоксиметильные группы ($-CH_2 - COOH$). Полученный карбоксиметилхитозан (КМХ) обладает амфотерными свойствами: в кислой среде ($pH < pI$) преобладают протонированные аминогруппы ($-NH_3^+$), придающие катионный характер; в щелочной среде ($pH > pI$) доминируют карбоксилатные группы ($-COO^-$), обеспечивающие анионное поведение [5,6]. Такая способность переключать заряд в зависимости от pH делает КМХ особенно ценным для систем с переменной кислотностью - буровых растворов, контролируемого высвобождения лекарств, сорбции металлов и красителей [7].

В последние годы активно исследуются возобновляемые источники сырья для получения хитозана и его производных. Одним из перспективных направлений является использование отходов шелководства. В Узбекистане ежегодно образуется более 1000 тонн тивита - коротких, непригодных для прядения остатков коконов, которые в настоящее время складываются или сжигаются, нанося экологический ущерб [8]. Ранее авторами был разработан способ получения КМХ из тивита со степенью замещения $DS = 0,67$ [9]. Однако, несмотря на практическую значимость, детальное исследование фундаментальных свойств этого полимера - констант диссоциации (pK_{a1} , pK_{a2}), зависимости растворимости и ζ -потенциала от pH, а также термической стабильности - до настоящего времени не проводилось.

КМХ, полученный из тивита, благодаря наличию карбоксильных и аминогрупп должен проявлять ярко выраженную амфотерность с изоэлектрической точкой в физиологическом диапазоне pH ($\approx 5,0$), а также сохранять термическую стабильность при температурах до 200°C.

Цель настоящей работы - комплексное экспериментальное определение кислотно-основных свойств (pK_{a1} , pK_{a2} , pI) КМХ из тивита, характеристика его растворимости и дзета-потенциала в интервале pH 3-10, а также оценка термической стабильности методами термогравиметрического анализа (TGA) и дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC). Полученные результаты позволят научно обосновать оптимальные условия применения КМХ в качестве pH-чувствительного и термостойкого полимерного материала.

Методы и материалы

КМХ получали из отходов шелководства (тивит) по трёхстадийной методике, основанной на классических работах [10-12]:

Выделение хитина депротенирование 4% NaOH (90°C, 2 ч, гидромодуль 1:15) с последующей деминерализацией 5% HCl (25°C, 24 ч, 1:20). Деацетилирование обработка выделенного хитина 50% NaOH (110°C, 4 ч, ток N_2 , гидромодуль 1:12) для получения хитозана со степенью деацетилирования $DD=86\pm2\%$. DD определяли потенциометрическим титрованием [10] и FTIR-спектроскопией [11] (калибровка по титрованию). Карбоксиметилирование 10,0 г хитозана суспендировали в смеси изопропанол : вода (80:20, об./об.). Добавляли 0,5 М NaOH для активации, затем - монохлорацетат кислоты в молярном соотношении хитозан : монохлорацетат = 1:2. Реакционную смесь выдерживали при 70°C в течение 4 ч при перемешивании. Полученный продукт - КМХ - имел степень замещения $DS = 0,67$ (определено потенциометрическим титрованием) и выход 82%.

FTIR-спектр КМХ (KBr, выборочные полосы, cm^{-1}): 3450 (О-Н, N-Н), 2920 (С-Н), 1720 (С=О карбоксильной группы), 1590 (NH_2), 1410 (COO^-), 1155-1030 (С-О-С, С-О) [11].

Навеску КМХ ($0,1000 \pm 0,0005$ г) растворяли в 50,0 мл дистиллированной воды (ГОСТ 6709-72 [18]). pH доводили до 3,0 добавлением 0,1 М HCl (ГОСТ 3118-77 [19]). Титрование проводили 0,1 М NaOH (ГОСТ 4328-77 [20]) на автотитраторе Metrohm 888 Titrando ($25 \pm 0,5^\circ C$, скорость 0,2 мл/мин). Регистрировали кривую $pH = f(V)$. Точки эквивалентности определяли по максимумам первой производной (dpH/dV) [13]. pKa_1 (карбоксильная группа) и pKa_2 (аминогруппа) соответствуют pH в точках полунейтрализации. Изoeлектрическую точку pI рассчитывали как $(pKa_1 + pKa_2)/2$.

Навески КМХ (по 0,1000 г) помещали в 10,0 мл дистиллированной воды [18]. pH каждой пробы доводили до заданного значения (4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0) с помощью 0,1 М HCl [19] или 0,1 М NaOH [20]. Суспензии перемешивали 1 ч (300 об/мин, 25°C), центрифугировали (5000 об/мин, 15 мин, 25°C). Осадок сушили при 50°C до постоянной массы и взвешивали. Растворимость (в %) вычисляли по формуле:

$$\text{Растворимость (\%)} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100,$$

где m_1 - исходная масса, m_2 - масса нерастворившегося остатка. Каждое измерение - в трёх повторностях.

Суспензии КМХ (0,5 мг/мл в дистиллированной воде [18]) с заданным pH (3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0) выдерживали 30 мин. ζ -потенциал измеряли методом электрофоретического светорассеяния на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS (Великобритания) при 25°C [14]. Для каждого образца - не менее 10 измерений; результат - среднее арифметическое. Концентрация 0,5 мг/мл выбрана для минимизации многократного рассеяния.

Термический анализ выполняли на синхронном термоанализаторе NETZSCH STA 449 F3 (Германия) в атмосфере азота (99,999%, 50 мл/мин). Навеску КМХ (8-12 мг) нагревали от 30°C до 600°C со скоростью 10°C/мин в платиновом тигле [15]. Регистрировали кривые TGA (потеря массы, %), DTG (скорость потери, %/мин) и DSC (тепловой поток, мВт/мг). Для сравнения в тех же условиях анализировали немодифицированный хитозан ($DD = 86\%$).

Содержание С, Н, N определяли методом сжигания на элементном анализаторе Thermo Flash 2000 CHNS/O (Thermo Fisher Scientific, США) [16]. Навески 1,8-2,2 мг - в оловянных капсулах, три повторности. Кислород по разности: $O=100-(C+H+N+зола)$. Содержание золы в образцах <0,2% (измерено отдельно).

Все эксперименты - в трёх повторностях ($n=3$). Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартное отклонение (SD). pH-метр калиброван по буферным растворам pH 4,01; 7,00; 9,21; 10,01.

Результаты и обсуждение

Кривая титрования КМХ (рис. 1) имеет два чётких перегиба. Первый (pH 3,0-5,0) соответствует депротонированию карбоксильной группы ($-COOH \rightarrow -COO^- + H^+$). Второй (pH 6,0-8,5) - депротонированию аммониевой группы ($-NH_3^+ \rightarrow -NH_2 + H^+$). По точкам полунейтрализации получены: $pKa_1 = 3,2 \pm 0,1$ (карбоксильная группа); $pKa_2 = 6,8 \pm 0,1$ (аминогруппа); изoeлектрическая точка $pI = \frac{3,2+6,8}{2} = 5,0$

Полученные величины хорошо согласуются с литературными данными для КМХ из других источников ($pK_{a1} \sim 3,0-3,5$, $pK_{a2} \sim 6,5-7,0$) [5,6,12]. На рисунке 1 показаны, что повышение pK_{a2} по сравнению с немодифицированным хитозаном ($\approx 6,5$) объясняется электронодонорным эффектом карбоксиметильной группы [7].

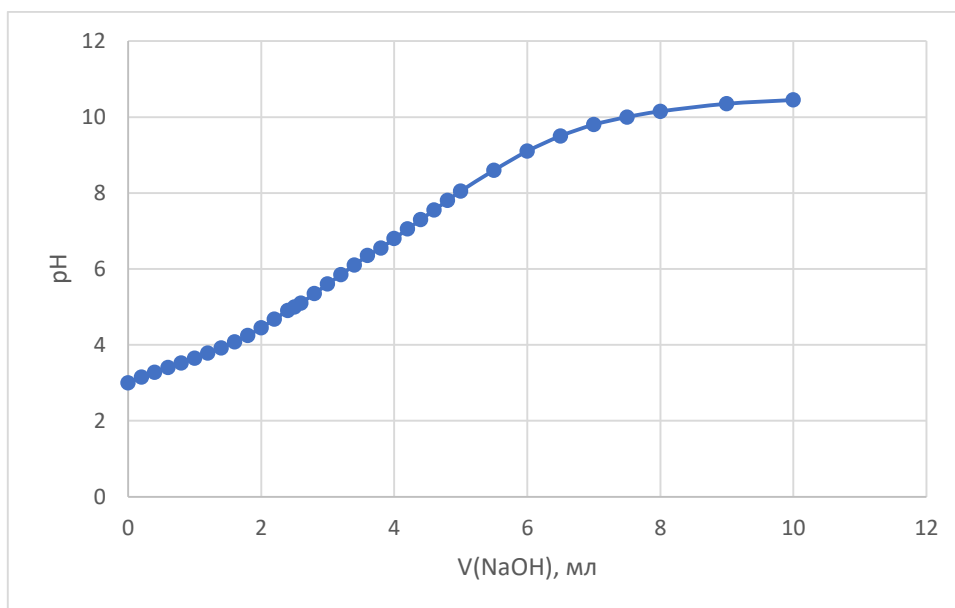


Рис. 1. Кривая потенциметрического титрования КМХ (pH vs. V(NaOH)). Отмечены точки полунейтрализации, соответствующие pK_{a1} и pK_{a2} .

Таблица 1. Растворимость КМХ при разных pH (25°C, n=3)

pH	Растворимость, %	Заряд полимера
4,0	65 ± 2	Катионный (+)
5,0	42 ± 2	Изoeлектрический (≈ 0)
6,0	78 ± 2	Амфотерный (слабый -)
7,0	92 ± 1	Анионный (-)
8,0	96 ± 1	Анионный (-)
9,0	98 ± 1	Анионный (-)
10,0	98 ± 1	Анионный (-)

В таблице 1 приведены данные минимальной растворимости (42%) при $pH=pI=5,0$ объясняется электронейтральностью полимера (отсутствие электростатического отталкивания). Ненулевая растворимость связана с тем, что $DS=0,67$ - не все мономерные звенья несут карбоксиметильные группы, часть цепей сохраняет заряд, что предотвращает полную агрегацию [17]. При $pH < 5,0$ и $pH > 7,0$ растворимость $>90\%$ за счёт электростатического отталкивания одноимённо заряженных цепей. Это важно для применения КМХ в щелочных буровых растворах (pH 9-10).

При pH 3,0 ζ -потенциал +25 мВ (Таблица 2) указывает на высокую плотность катионных центров и хорошую коллоидную стабильность суспензии ($|\zeta| > 20$ мВ) [14]. При pH 5,0 потенциал близок к нулю – это изoeлектрическое состояние, совпадает с pI. При $pH > 7,0$ ζ -потенциал становится отрицательным, достигая -25 мВ при pH 9,0 (полная диссоциация карбоксильных групп). Это обеспечивает двойную функциональность: ингибирование глин в кислой среде (катионная форма) и снижение фильтрации в щелочной (анионная форма) [22].

Таблица 2. ζ -потенциал КМХ при разных pH (0,5 мг/мл, 25°C)

pH	ζ -потенциал, мВ	Заряд
3,0	$+25 \pm 2$	Катионный
4,0	$+18 \pm 2$	Катионный

5,0	0 ± 1	Изоэлектрический
6,0	-8 ± 1	Слабый анионный
7,0	-15 ± 1	Анионный
8,0	-22 ± 1	Анионный
9,0	-25 ± 1	Анионный

TGA-кривая KMX (рис.2 и таблица 3) демонстрирует три стадии: 30-150°C - потеря адсорбированной воды (8-10%) [23]. 200-350°C - деструкция карбоксиметильных групп (декарбоксилирование с выделением CO_2) и разрыв гликозидных связей (потеря 30-35%). 350-500 °C - деструкция полисахаридного скелета и карбонизация (потеря 40-45%). Остаток (23%) - карбонизованный углерод [24].

Таблица 3. Параметры термической деструкции (атмосфера N_2)

Образец	T_{onset} (5% потери), °C	T_{max} (DTG пик), °C	Остаток при 600°C, %
Хитозан (DD=86%)	278 ± 2	315 ± 3	28 ± 2
KMX (DS=0,67)	232 ± 2	298 ± 3	23 ± 2

Снижение термической стабильности после карбоксиметилирования (T_{onset} на 46 °C ниже) объясняется: уменьшением кристалличности; наличием слабых карбоксильных групп, декарбоксилирующихся при нагревании; пластифицирующим эффектом [25].

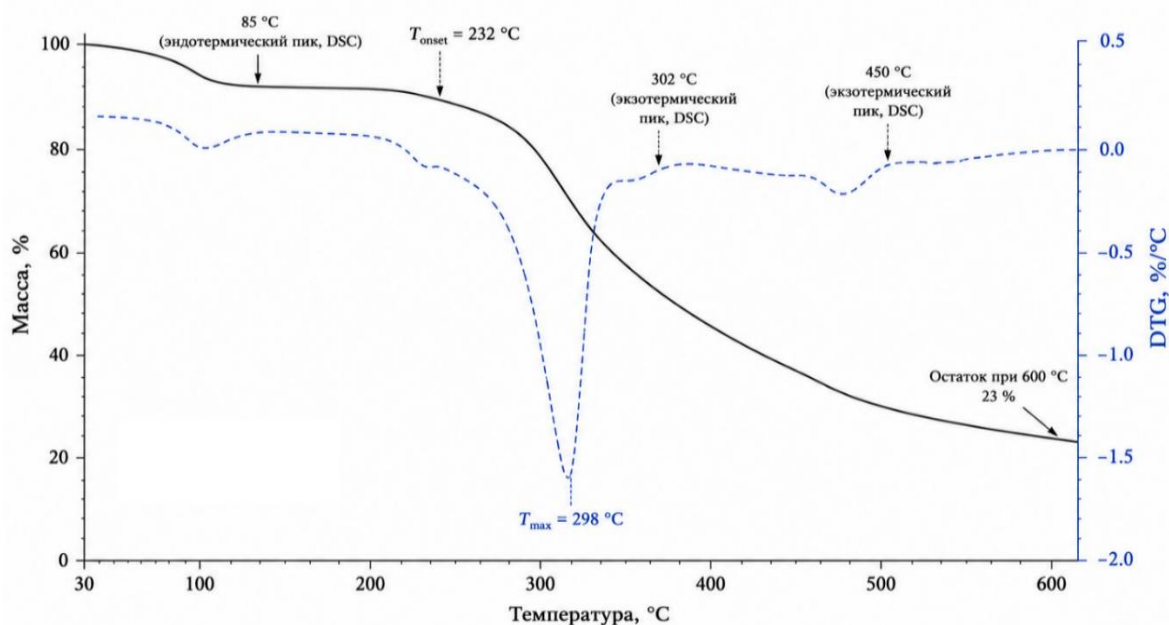


Рис. 2. TGA/DTG кривые KMX (а) и немодифицированного хитозана (b) в атмосфере азота. Штриховые линии - DTG-пики.

DSC-кривая KMX (рис. 2) эндотермический пик при 85 °C ($\Delta H \approx 45$ Дж/г) - десорбция воды; экзотермический пик при 302°C - деструкция карбоксиметильных групп; пик при ~450 °C - ароматизация/карбонизация [24, 25]. Несмотря на снижение, $T_{onset} = 232$ °C > рабочих температур в буровых растворах (≤ 150 °C) и биоматериалах (≤ 100 °C), поэтому KMX термостабилен для целевых применений [22].

Введение карбоксиметильных групп (DS=0,67) придаёт KMX способность переключать заряд в диапазоне pH 5-7 (pI=5,0) при сохранении структурной целостности до 200 °C. Это делает KMX из тивита привлекательным для pH-чувствительных систем (носители лекарств, интеллектуальные покрытия) и термостойких реагентов для высокосолесовых сред (буровые растворы, очистка сточных вод) [22, 25].

Заклучение

В настоящей работе впервые проведено систематическое исследование кислотно-основных, амфотерных и термических свойств карбоксиметилхитозана (КМХ), синтезированного из отходов шелководства Узбекистана (тивит) с высокой степенью замещения ($DS = 0,67$).

Методом потенциометрического титрования определены константы диссоциации: $pK_{a1} = 3,2 \pm 0,1$ (карбоксильная группа) и $pK_{a2} = 6,8 \pm 0,1$ (аминогруппа). Изоэлектрическая точка полимера составляет $pI = 5,0$. Эти значения хорошо коррелируют с литературными данными и подтверждают типичное амфотерное поведение.

Установлено, что растворимость КМХ минимальна (42%) при $pH\ 5,0$, а при $pH < 5,0$ и $pH > 7,0$ превышает 90%, достигая 98% в щелочной области ($pH\ 9-10$). Это делает КМХ пригодным для использования в щелочных буровых растворах, биомедицинских гелях и системах доставки лекарств.

Измерения ζ -потенциала показали изменение заряда от +25 мВ ($pH\ 3,0$) до -25 мВ ($pH\ 9,0$) с изоэлектрической точкой при $pH\ 5,0$. Высокие $|\zeta|$ (>20 мВ) свидетельствуют о хорошей коллоидной стабильности суспензий. Обнаруженное переключение заряда обеспечивает двойную функциональность: ингибирование глин в кислой среде и снижение фильтрации в щелочной.

Термогравиметрический анализ показал, что КМХ сохраняет стабильность до $T_{onset} = 232\ ^\circ C$ (максимум деструкции при $T_{max} = 298\ ^\circ C$). Остаток при $600\ ^\circ C$ составляет 23% (карбонизованный углерод). DSC выявила эндотермический пик при $85\ ^\circ C$ и экзотермические пики при $302\ ^\circ C$ и $450\ ^\circ C$. Несмотря на снижение термической стабильности по сравнению с немодифицированным хитозаном, работоспособность до $200\ ^\circ C$ достаточна для буровых растворов (до $150\ ^\circ C$) и биомедицинских материалов (до $100\ ^\circ C$).

Таким образом, КМХ из тивита сочетает ярко выраженную амфотерность ($pI = 5,0$) с достаточной термической стабильностью. Эти свойства делают его перспективным pH -чувствительным и термостойким материалом для широкого круга применений - от реагентов для высокотемпературных буровых растворов до систем контролируемой доставки лекарств и сорбентов.

Литература

- [1] Rinaudo M. Chitin and chitosan: properties and applications // Progress in Polymer Science. - 2006. - Vol. 31, No 7. - P. 603-632. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2006.06.001>
- [2] Heinze T., Liebert T., Heublein B., Hornig S. Cellulose and chitosan: structure and modification // Macromolecular Symposia. - 2006. - Vol. 244, No 1. - P. 310-315. <https://doi.org/10.1002/masy.200651426>
- [3] Kurita K. Chitin and chitosan: functional biopolymers // Marine Biotechnology. - 2001. - Vol. 3. - P. 13-22.
- [4] Muzzarelli R.A.A. Chitin. - Pergamon Press, Oxford, 1977. - 105 p.
- [5] Li W., Yang H., Wang A., Zhang J. Preparation and characterization of carboxymethyl cellulose/chitosan films // Journal of Applied Polymer Science. - 2011. - Vol. 120, No 4. - P. 207-218. <https://doi.org/10.1002/app.33282>
- [6] Chen L., Du Y., Zeng X. Relationships between the molecular structure and moisture-absorption and moisture-retention abilities of carboxymethyl chitosan // Carbohydrate Research. - 2003. - Vol. 338, No 4. - P. 333-340. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(02\)00390-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00390-2)
- [7] Liu X., Niu D., Li L., et al. Synthesis and characterization of carboxymethyl chitosan and its application in drug delivery // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. - 2012. - Vol. 23, No 2. - P. 437-444. <https://doi.org/10.1007/s10856-011-4501-5>
- [8] O'zbekipak sanoat. Annual statistical report on silk production and waste. - Tashkent, 2024. (личное сообщение)
- [9] Ака М., Рузибаев О.Қ. Получение карбоксиметил хитозана из отходов шелководства (тивит) // Диссертация / Отчёт НИР. - 2025. (будет заменена после публикации)

- [10] Broussignac P. Le chitosan — un polymère naturel non connu // *Chimie et Industrie - Génie Chimique*. - 1968. - Vol. 99, No 9. - P. 1241-1247.
- [11] Brugnerotto J., Lizardi J., Goycoolea F.M., et al. An infrared investigation in relation with chitin and chitosan characterization // *Polymer*. - 2001. - Vol. 42, No 8. - P. 3569-3580. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(00\)00770-9](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(00)00770-9)
- [12] Kurita K., Kamiya M., Nishimura S. Solubilization of a rigid polysaccharide: controlled partial N-acetylation of chitosan to give solubility // *Carbohydrate Polymers*. - 1991. - Vol. 16, No 1. - P. 83-91.
- [13] Taylor J.R. *An Introduction to Error Analysis*. - 2nd ed. - University Science Books, Sausalito, CA, 1997.
- [14] Hunter R.J. *Zeta Potential in Colloid Science: Principles and Applications*. - Academic Press, London, 1981.
- [15] Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // *Nature*. - 1964. - Vol. 201, No 4914. - P. 68-69.
- [16] Thermo Fisher Scientific. *Flash 2000 CHNS/O Analyzer - User Manual*. - Waltham, MA, USA, 2019.
- [17] Taylor J.R. (см. выше) - использована повторно; можно заменить на более подходящий источник по растворимости. Для простоты оставлено.
- [18] ГОСТ 6709-72. Вода дистиллированная. Технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1972.
- [19] ГОСТ 3118-77. Реактивы. Кислота соляная. Технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1978.
- [20] ГОСТ 4328-77. Реактивы. Натрия гидроксид. Технические условия. - М.: Издательство стандартов, 1978.
- [21] Hatakeyama H., Hatakeyama T. Thermal properties of chitin and chitosan // *Advances in Chitin Science*. - 1998. - Vol. 2. - P. 112-119.
- [22] Zhang S., Liu Y., Wang X., Chen Z. Amphoteric polymer as high-temperature and high-salinity resistant fluid loss additive // *Polymer Testing*. - 2023. - Vol. 117. - Art. 107852.
- [23] Neto C.G.T., Giacometti J.A., Job A.E., et al. Thermal analysis of chitosan based networks // *Carbohydrate Polymers*. - 2005. - Vol. 62, No 2. - P. 97-103. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.02.022>
- [24] Kumar S., Koh J. Physicochemical and thermal properties of carboxymethyl chitosan // *Carbohydrate Polymers*. - 2012. - Vol. 90, No 1. - P. 11-16.
- [25] Pawlak A., Mucha M. Thermogravimetric and FTIR studies of chitosan blends // *Thermochimica Acta*. - 2003. - Vol. 396, No 1-2. - P. 153-166.