



**К.О. Богданова^{*}, Г.Т. Доланбаева¹, В.Н. Николаева², С.К. Кабдрахманова¹,
А.К. Кабдрахманова^{3,4}**

¹Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева
050013, Республика Казахстан, г. Алматы, ул.Каныша Сатпаева, 22

²Восточно-Казахстанский университет им. Сарсена Аманжолова
070002, Республика Казахстан, г.Усть-Каменогорск, ул.30-й Гвардейской дивизии, 34

³ТОО «Научный центр композиционных материалов»,
050000, Республика Казахстан, г.Алматы, Алмалинский район, ул.Нурмакова, д. 79,

⁴ТОО «Научно-исследовательский институт «TrueScience»,
050054, Республика Казахстан, г.Алматы, Турксибский район, ул.Тукая, 33

^{*}e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА МНОГОСЛОЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ НА ОСНОВЕ МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ КОНТРОЛИРУЕМОЙ ДОСТАВКИ ФУЗИКОКЦИНА НА СЕМЕНАХ СОИ

Аннотация: Эффективность применения фитогормонов в значительной степени ограничивается их стремительной деградацией, неравномерным распределением на поверхности семян и отсутствием контроля за высвобождением в процессе прорастания. В данной работе разработана и исследована многослойная полимерная оболочка на основе метилцеллюлозы с использованием минерального наполнителя (тальк) и полисахаридного наполнителя (картофельный крахмал) для контролируемой доставки фитогормона фузикоцина (FC) на семенной материал сои. Изучены физико-химические характеристики покрытий, равномерность нанесения, кинетика деградации и высвобождение активного вещества при различных температурно-влажностных условиях. Установлено, что композиции на основе метилцеллюлозы и талька обладают более высокой механической стабильностью, меньшей склонностью к набуханию и более продолжительным временем деградации по сравнению с крахмальными системами. Высвобождение FC подчиняется кинетике первого порядка с константой скорости $0,025 \text{ ч}^{-1}$ и периодом полувыведения 27,8 ч. Полученные результаты подтверждают перспективность применения разработанных метилцеллюлозно-тальковых оболочек для пролонгированной и контролируемой доставки фитогормонов в технологиях предпосевной обработки семян. В дальнейшем данные будут использованы при исследованиях в области изучения полимерных покрытий в условиях прорастания семян.

Ключевые слова: метилцеллюлоза, фузикоцин, оболочка семян, контролируемое высвобождение, тальк, соя.

Введение

Повышение эффективности предпосевной обработки семян является одной из ключевых задач современного растениеводства, поскольку ранние этапы онтогенеза растений в значительной степени определяют продуктивность агроценозов и устойчивость культур к абиотическим стрессам [1, 2]. Адресная доставка биологически активных веществ к семенному материалу рассматривается как перспективный инструмент управления физиологическими процессами прорастания, обеспечивающий повышение энергии

прорастания, выравненность всходов и улучшение начального роста растений [3]. Вместе с тем традиционные методы нанесения фитогормонов и регуляторов роста характеризуются рядом существенных ограничений, включая быстрое вымывание действующих веществ, их неравномерное распределение по поверхности семян и отсутствие контроля над скоростью и направленностью их поступления в ткани [4, 5].

Фузикоцин (FC) относится к классу высокоактивных фитогормонов, проявляющих выраженное физиологическое действие в ультранизких концентрациях за счёт активации H^+ – АТФазы плазматической мембраны и усиления клеточного растяжения [6, 7]. Благодаря этому FC рассматривается как перспективный регулятор роста на ранних стадиях развития растений. Однако высокая биологическая активность данного соединения обуславливает узкое «терапевтическое окно» его применения: незначительное превышение оптимальной дозы или неконтролируемое высвобождение может приводить к ингибирующим эффектам и проявлениям фитотоксичности [7]. Это существенно ограничивает практическое использование FC в традиционных препаративных формах и подчёркивает необходимость разработки систем его контролируемой доставки.

В последние годы значительный интерес вызывают полимерные оболочки на основе биосовместимых и биоразлагаемых материалов, способные выполнять функцию носителей биологически активных соединений и обеспечивать пролонгированное и дозированное высвобождение действующих веществ [8, 10, 11]. Среди таких материалов особое место занимает метилцеллюлоза — неионное производное целлюлозы, широко применяемое в фармацевтических, биомедицинских и агробиотехнологических системах благодаря способности формировать однородные полупроницаемые плёнки [8, 10, 11].

Метилцеллюлоза позволяет направленно изменять свойства оболочки за счёт введения наполнителей. Минеральные наполнители влияют на морфологию, пористость, устойчивость матрицы и скорость высвобождения фитогормонов [8, 10, 11]. При этом их влияние по сравнению с полисахаридными наполнителями изучено недостаточно. Выбор метилцеллюлозы обусловлен её биосовместимостью, неионной природой и способностью формировать полупроницаемые плёнки. Использование талька в качестве минерального наполнителя позволяет дополнительно регулировать морфологию и пористость покрытия без изменения химической природы полимерной системы. Химическая инертность и низкая гидрофильность талька способствуют повышению механической стабильности оболочки и замедлению её деградации, что делает комбинацию «метилцеллюлоза-тальк» рациональной основой для систем контролируемого высвобождения высокоактивных фитогормонов [10, 11].

Целью настоящей работы являлась разработка многослойной полимерной оболочки на основе метилцеллюлозы для семян сои и комплексная оценка влияния минерального и полисахаридного наполнителей на стабильность покрытия, кинетику деградации и параметры контролируемого высвобождения FC.

Материалы и методы

Для формирования полимерной оболочки использовали метилцеллюлозу $[C_6H_7O_2(OH)_3 \cdot x(OCH_3)]_n$ как плёнообразующий и связывающий компонент. Выбор этого полимера обусловлен его способностью образовывать вязкие растворы, обеспечивать равномерное распределение состава по поверхности семян и повышать прочность покрытия. В качестве наполнителей применяли крахмал $(C_6H_{10}O_5)_n$ и тальк $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$, которые использовали для изменения структуры оболочки и её технологических свойств. Подобные полимерные композиции применяются в технологиях покрытия семян для улучшения адгезии, снижения пыления и более равномерного нанесения активных веществ на поверхность семени.

Рабочий раствор FC готовили в водно-спиртовой системе [6], что обеспечивало равномерное распределение вещества при сверхмалых концентрациях. Навеску FC массой 0,05 мг предварительно растворяли в 1 мл 96% этанола, после чего объём доводили дистиллированной водой до 1 л. Полученный раствор с концентрацией 50 нг/мл использовали сразу после приготовления либо хранили при температуре +4 °C не более 72 часов. Подготовку и замачивание семян проводили в соответствии с методами предпосевной гормональной обработки [3]. После обработки семена подсушивали и помещали во вращающийся барабан, где поэтапно наносили 1% раствор полимерной основы. Для изменения структуры покрытия применяли наполнители, которые используются в

полимерных матрицах контролируемого высвобождения [8, 10, 11]. Качество нанесения оболочки оценивали по приросту массы семян. При этом учитывали, что допустимое увеличение массы не должно превышать 10%, поскольку именно такой предел соответствует агротехническим требованиям и не ухудшает посевные качества семенного материала [4, 5].

Стабильность и деградацию полимерных покрытий изучали при различных температуре и влажности, которые используются при анализе систем пролонгированного высвобождения [11, 12]. В качестве интегрального показателя устойчивости определяли время сохранности 50% оболочки (t_{50}), что позволяло сопоставить долговечность различных вариантов покрытия между собой.

Остаточное содержание ФС определяли спектрофотометрическим методом при длине волны 254 нм с использованием калибровочного графика и холостых проб [6]. Для анализа профилей высвобождения применяли классические кинетические модели, включая кинетику первого порядка, модель Хигучи и модель Корсмейера-Пеппаса. Параметры моделей рассчитывали методом наименьших квадратов, а выбор наиболее подходящей модели проводили по коэффициенту детерминации (R^2), характеру остатков и физической интерпретируемости полученных параметров. При необходимости анализ выполняли отдельно для раннего и позднего этапов высвобождения, что позволяло точнее описывать двухстадийный характер процесса.

Все эксперименты выполняли не менее чем в трёх биологических повторах, а измерения массы и деградации оболочки — в трёх технических повторах для каждого варианта. Полученные данные представляли в виде среднего значения $\pm$ стандартное отклонение (SD). Для сравнения групп использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с пост-хок тестом Тьюки при уровне значимости $p < 0,05$. Обработку данных и аппроксимацию кинетических кривых проводили в программе OriginPro 2022.

Результаты и обсуждение

Результаты визуальной и весовой оценки показали, что тип и дозировка наполнителя оказывают определяющее влияние на морфологию и качество формируемого полимерного покрытия. Концептуальная схема разработанной многослойной полимерной оболочки для контролируемой доставки ФС на семена сои представлена на рисунке 1.

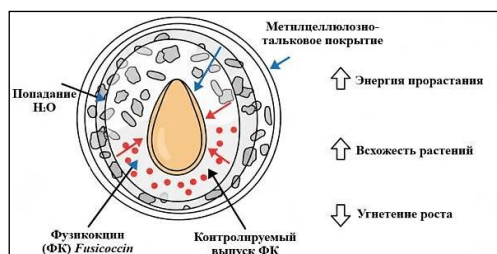


Рисунок 1 – Схематическое изображение многослойной полимерной оболочки на основе метилцеллюлозы с минеральным наполнителем (тальк), предназначенной для контролируемой доставки ФС на семенах сои и её влияния на ранние этапы прорастания

Наиболее равномерное и тонкое покрытие было получено при использовании талька. Как показано на рисунке 2а, прирост массы семян существенно зависел от вида и количества наполнителя. На рисунке 2б показан анализ равномерности покрытия семян сои при разных наполнителях. Применение талька в дозировке 2,5 г на 20 г семян обеспечивало умеренный прирост массы ($7,1 \pm 1,9\%$), не превышающий агротехнический предел 10%, и одновременно сопровождалось высоким показателем равномерности покрытия (8 баллов), что указывает на формирование наиболее технологически приемлемой оболочки.

При увеличении дозировки талька до 5,0 г на 20 г семян наблюдалось формирование более плотного покрытия с максимальной визуальной равномерностью, однако дальнейшее увеличение количества минерального наполнителя приводило к утолщению оболочки и появлению локальных дефектов, включая микротрещины и снижение эластичности. Это указывает на существование оптимального диапазона концентраций талька, при котором достигается баланс между механической прочностью и пластичностью полимерной матрицы, что согласуется с данными о поведении минеральных наполнителей в полимерных системах [5].

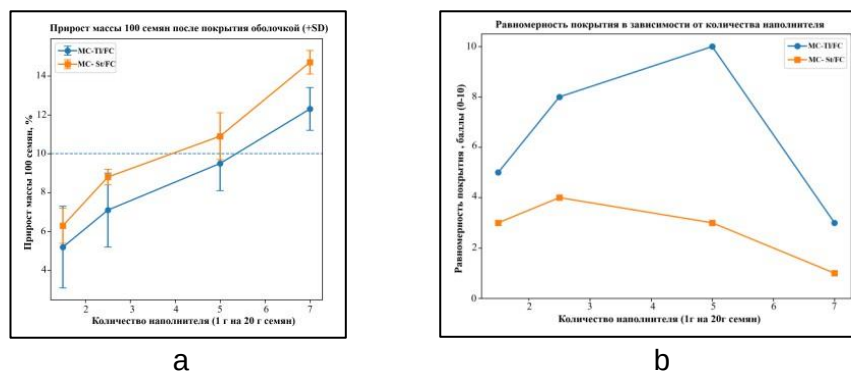


Рисунок 2 – Влияние вида и количества наполнителя на качество покрытия семян сои
а – прирост массы 100 семян после нанесения оболочки (пунктирной линией обозначен агротехнический предел 10%); б – показатель равномерности покрытия (шкала 0-10 баллов)

Образцы оболочек с использованием картофельного крахмала демонстрировали иные морфологические характеристики. Уже при умеренных дозировках наполнитель придавал покрытию повышенную пористость и менее выраженную равномерность. При увеличении количества крахмала наблюдалась склонность оболочки к рыхлению и частичному отслаиванию, сопровождавшаяся ростом массы семян. Данные эффекты обусловлены высокой гидрофильностью полисахаридного наполнителя и его способностью интенсивно поглощать влагу, что приводит к набуханию и снижению механической устойчивости покрытия [8].

Сравнительный анализ показал, что тальк как химически инертный и слабогидрофильный минеральный наполнитель способствует формированию более плотной и стабильной полимерной матрицы, ограничивает избыточное водопоглощение и обеспечивает контролируемую пористость оболочки. В отличие от него, картофельный крахмал повышает водоудерживающую способность покрытия, что может способствовать локальному увлажнению семян, однако при превышении оптимальной дозировки ухудшает адгезию и снижает эксплуатационные свойства оболочки [8, 10, 11]. Изучение кинетики деградации показало, что скорость разрушения покрытия зависит как от условий хранения, так и от природы наполнителя. Как видно на рисунке 3а, оболочки с тальком характеризовались более медленной и предсказуемой потерей целостности, тогда как системы с картофельным крахмалом демонстрировали ускоренную деструкцию и достигали t_{50} в более ранние сроки, что видно в сравнении покрытия на рисунке 3б.

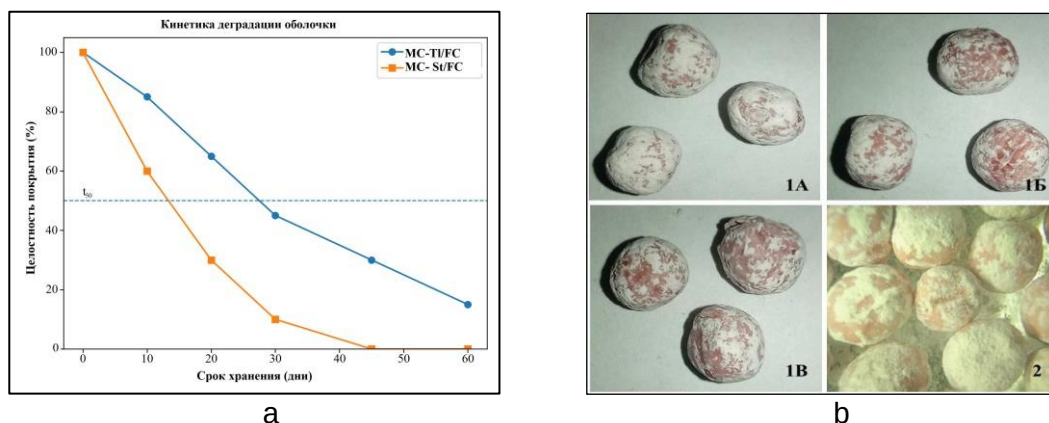


Рисунок 3 – Деградация полимерных оболочек на основе метилцеллюлозы в процессе хранения и оптические микрофотографии семян сои, покрытых метилцеллюлозными композициями с различными наполнителями
а – кинетика деградации оболочек MC-Ti/FC и MC-St/FC; пунктирной линией показано время, соответствующее потере 50% целостности оболочки (t_{50});
б – внешний вид семян сои с покрытиями: 1А–1Б – варианты с тальком (MC-Ti/FC), 2 – вариант с картофельным крахмалом (MC-St/FC)

Уже на ранних стадиях хранения крахмальные оболочки демонстрировали интенсивное набухание, рыхление структуры и появление множественных трещин, что сопровождалось ускоренным отслаиванием покрытия от поверхности семян (табл. 1). При температуре 30°C и относительной влажности 70% время сохранности 50% покрытия (t_{50}) для варианта с тальком составляло около 25 суток, тогда как для оболочек с картофельным крахмалом данный показатель не превышал 12 суток. В отличие от этого, тальковый наполнитель способствовал формированию более плотной и тонкой оболочки, деградация которой происходила постепенно и носила локальный характер.

Таблица 1 – Обобщённые характеристики полимерных оболочек, деградации и биологической эффективности

Вид наполнителя	Количество (г на 20 г семян)	Равномерность покрытия (0-10 баллов)	Прирост массы 100 семян, % ($\pm SD$)	Стабильность оболочки (t_{50} , сут)	Характер высвобождения
Тальк	1,5	5	$5,2 \pm 2,1$	~25	Контролируемое
Тальк	2,5	8	$7,1 \pm 1,9$	~25	Первый порядок
Тальк	5,0	10	$9,5 \pm 1,4$	~25	Первый порядок
Тальк	7,0	3	$12,3 \pm 1,1$	~25	Замедленная диффузия
Крахмал	1,5	3	$6,3 \pm 0,9$	~12	Ускоренное
Крахмал	2,5	4	$8,8 \pm 0,4$	~12	Ускоренное
Крахмал	5,0	3	$10,9 \pm 1,2$	~12	Быстрое
Крахмал	7,0	1	$14,7 \pm 0,6$	~12	Неконтролируемое

При повышенной температуре и влажности (t 35°C, RH 80%) различия между системами усиливались. Крахмальная оболочка подвергалась практически полной деструкции в течение 30 суток, тогда как оболочка на основе метилцеллюлозы и талька сохраняла остаточные фрагменты покрытия вплоть до 60 суток. Наблюдаемая разница обусловлена высокой гидрофильностью полисахаридного наполнителя, приводящей к интенсивному поглощению и ускоренной эрозии полимерной матрицы, тогда как химически инертный тальк ограничивает доступ влаги и снижает скорость набухания покрытия [8, 5].

При более мягких условиях хранения (t 22°C, RH 40%) обе системы демонстрировали повышенную стабильность: оболочки сохраняли целостность в течение первых 30 суток, а деградация носила медленный характер и проявлялась преимущественно в виде постепенного истончения слоя. Тем не менее даже в этих условиях оболочки с тальком отличались более высокой сохранностью по сравнению с крахмальными аналогами, что подтверждает стабилизирующую роль минерального наполнителя в полимерной матрице [12].

Высвобождение FC из полимерной оболочки оценивали по остаточному содержанию фитогормона на поверхности семян и в составе оболочки в течение 48 часов после обработки. Полученные данные показали постепенное снижение его концентрации в полимерной матрице, что указывает на контролируемое высвобождение и/или поглощение семенами. Как показано на рисунке 4, высвобождение FC из метилцеллюлозно-тальковой оболочки наиболее точно описывалось моделью первого порядка с константой скорости $0,025 \text{ ч}^{-1}$ и периодом полувыведения 27,8 часа.

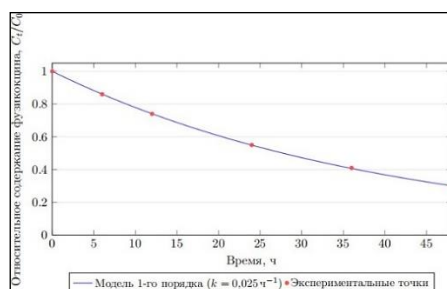


Рисунок 4 – Кинетика контролируемого высвобождения FC из метилцеллюлозной оболочки с тальком. Экспериментальные данные аппроксимированы моделью кинетики первого порядка

Качественные различия, обусловленные наполнителем, подтверждаются обобщёнными характеристиками (табл. 1). Для тальк-содержащих покрытий при 2,5-5,0 г на 20 г семян высвобождение классифицировано как «первый порядок», что согласуется с полученной для системы «метилцеллюлоза–тальк» кинетикой и высокой стабильностью оболочки ($t_{50} \approx 25$ сут). При увеличении доли талька до 7,0 г наблюдается ухудшение равномерности и рост прироста массы выше агротехнического порога, а характер высвобождения смещается в сторону «замедленной диффузии», что может объясняться уплотнением матрицы и усилением барьерного эффекта.

Для крахмалосодержащих вариантов ($t_{50} \approx 12$ сут) характер высвобождения описан как «ускоренный/быстрый» вплоть до «неконтролируемого» при 7,0 г. Это коррелирует с высокой гидрофильностью крахмала и его склонностью к набуханию: в таких системах диффузионный перенос накладывается на релаксацию и частичную эрозию матрицы, что приводит к ускорению выхода действующего вещества. На рисунке 4 показана кинетика контролируемого высвобождения FC из оболочки, где наполнитель выступает ключевым регулятором механизма транспорта: тальк повышает структурную целостность и замедляет перенос за счёт увеличения пластичности и уменьшения эффективной пористости, тогда как крахмал усиливает водопоглощение и структурную перестройку покрытия, ускоряя высвобождение. Это объясняет, почему система «метилцеллюлоза–тальк» наиболее пригодна для пролонгированной доставки FC в критический ранний период прорастания семян.

Наибольшее снижение содержания FC в оболочке наблюдалось в первые 24 часа после обработки семян, тогда как в интервале 24-48 часов скорость высвобождения заметно снижалась. Это указывает на переход процесса в диффузионно-ограниченный режим, характерный для гидрофильных полимерных матриц [11, 12]. Для количественного описания кинетики использовали модель первого порядка, которая показала высокую степень соответствия экспериментальным данным: зависимость $\ln(C_i)$ от времени характеризовалась коэффициентом аппроксимации $R^2 > 0,99$. Рассчитанная константа скорости высвобождения составила $0,025 \text{ ч}^{-1}$, а период полувыведения — 27,8 часа. Полученные значения свидетельствуют о медленном и контролируемом высвобождении FC из метилцеллюлозно-тальковой матрицы, что обеспечивает пролонгированное действие фитогормона в течение первых двух суток после обработки семян. Сопоставление кинетики высвобождения с результатами деградационных испытаний (рис. 5) показало, что разрушение полимерной оболочки и диффузия действующего вещества являются взаимосвязанными процессами. Более высокая стабильность тальковой оболочки обеспечивала более равномерное поступление FC и снижала риск его неконтролируемого действия. При этом концентрация 50 нг/мл оказалась оптимальной для стимуляции прорастания семян сои и начального роста проростков: она повышала энергию прорастания и общую всхожесть без признаков фитотоксичности, тогда как более высокие концентрации вызывали частичное угнетение прорастания семян [6, 7].

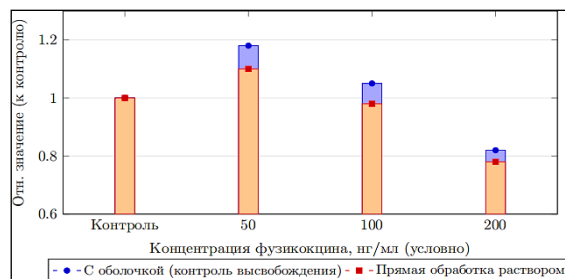


Рисунок 5 – Влияние концентрации FC и способа его внесения на показатели прорастания семян сои. Данные представлены в виде относительных значений, нормированных по отношению к необработанному контролю

Повышение концентрации FC приводило к частичному угнетению роста и снижению положительного физиологического эффекта, что указывает на узкий диапазон эффективных доз данного фитогормона [7]. Это подчёркивает важность точного дозирования и контроля

скорости поступления действующего вещества в ткани семян. Применение полимерной оболочки на основе метилцеллюлозы с минеральным наполнителем обеспечивало более равномерное и пролонгированное высвобождение FC, способствуя поддержанию его концентрации в физиологически оптимальном диапазоне на ранних стадиях прорастания. В отличие от прямой обработки раствором, такая система доставки снижает риск локальной передозировки и связанных с ней фитотоксических эффектов [11, 12]. Кинетические параметры высвобождения согласуются с временными рамками физиологической активации семян, а результаты биологических испытаний подтверждают, что сочетание концентрации 50 нг/мл и метилцеллюлозно-тальковой оболочки обеспечивает выраженный стимулирующий эффект без негативного воздействия на семенной материал.

С практической точки зрения оболочка должна быть не только эффективной, но и экологически нейтральной на этапах хранения семян, посева и последующей трансформации в почве. Метилцеллюлоза относится к биоразлагаемым производным целлюлозы и обычно разлагается почвенными микроорганизмами до низкомолекулярных продуктов, не образуя стойких загрязнителей, тогда как тальк является химически инертным магниесиликатом и выполняет главным образом функцию минерального наполнителя, влияя преимущественно на физические свойства поверхности и водный режим в микроне зоне семени. При разработке технологии важно учитывать возможную миграцию остаточного этанола из покрытия при хранении и его влияние на всхожесть, потенциальную сорбцию FC на минеральной фазе и изменение его биодоступности, а также воздействие на нецелевые организмы при превышении доз или систематическом применении. С технологической точки зрения ключевыми параметрами масштабирования остаются вязкость раствора метилцеллюлозы, скорость вращения барабана и режим сушки, поскольку именно они определяют толщину и дефектность слоёв. При этом прирост массы семян должен оставаться ниже агротехнического предела 10%, так как избыточное утяжеление и закупорка микропиле могут снижать газообмен и замедлять набухание семени.

Выводы

В настоящей работе разработана и экспериментально обоснована многослойная полимерная оболочка на основе метилцеллюлозы для контролируемой доставки фитогормона FC на семенной материал сои. Показано, что природа используемого наполнителя оказывает решающее влияние на морфологию покрытия, его механическую устойчивость, кинетику деградации и параметры высвобождения действующего вещества.

Установлено, что применение минерального наполнителя (талька) в дозировке 2,5 г на 20 г семян обеспечивает формирование равномерного, тонкого и устойчивого покрытия с допустимым приростом массы семян ($7,1 \pm 1,9\%$), соответствующим агротехническим требованиям. В сравнении с полисахаридным наполнителем (картофельный крахмал) тальковая оболочка характеризуется меньшей склонностью к набуханию, более высокой механической стабильностью и замедленной деградацией при повышенных температурно-влажностных условиях.

Показано, что деградация полимерной оболочки и высвобождение FC являются взаимосвязанными процессами. Оболочка на основе метилцеллюлозы и талька обеспечивает контролируемое высвобождение фитогормона, которое адекватно описывается моделью первого порядка с константой скорости $k = 0,025 \text{ ч}^{-1}$ и периодом полувыведения 27,8 часа. Такая кинетика позволяет поддерживать концентрацию FC в физиологически оптимальном диапазоне в течение первых двое суток после обработки семян, что особенно важно с учётом его высокой биологической активности.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования метилцеллюлозно-тальковых оболочек в технологиях предпосевной обработки семян для пролонгированной и дозированной доставки фитогормонов. Предложенный подход может быть адаптирован для других биологически активных соединений и сельскохозяйственных культур, что открывает возможности для дальнейшего развития экологически безопасных и ресурсосберегающих агротехнологий.

Список литературы

1. Seeds: Physiology of Development / J.D. Bewley et al // Germination and Dormancy. 3rd ed. – New York: Springer, 2013. – 392 p.

2. Finch-Savage W.E. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation / W.E. Finch-Savage, G.W. Bassel // Journal of Experimental Botany. – 2016. – Vol. 67, № 3. – P. 567-591. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv490>.
3. Growth stimulating and fungicidal properties of succinic acid complexes with silver, copper and boron ions during pre-sowing treatment of soybean seeds / S.K. Kabdrakhmanova et al // Engineered Science. – 2023. – Vol. 26. – Art. 973. <https://doi.org/10.30919/es973>.
4. Kapsulirovanie semyan maslichnykh kul'tur kak bezopasnaya sistema primeneniya sredstv zashchity rastenii / A.K. Kabdrakhmanova i dr. // Vestnik NYATs RK. – 2023. – № 3. – S. 111-120. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2023-3-111-120>. (In Russian).
5. Seed coating technology: an innovative and sustainable approach for improving seed quality and crop performance / T. Javed et al // Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. – 2022. – Vol. 21, № 8. – P. 536-545. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.03.003>.
6. Marrè E. Fusicoccin: a tool in plant physiology / E. Marrè // Annual Review of Plant Physiology. – 1979. – Vol. 30. – P. 273-288. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.30.060179.001421>.
7. Phytohormones and Plant Growth Regulators — A Review / C.E. Agudelo-Morales et al // Journal of Science with Technological Applications. – 2021. – Vol. 10. – P. 27-65. <https://doi.org/10.34294/j.jsta.21.10.66>.
8. Oxidized starch/CMC based biofilm: synthesis and characterization / K. Akatan et al // Physical Sciences and Technology. – 2024. – Vol. 11, № 1-2. – P. 58-63. <https://doi.org/10.26577/phst2024v11i1a7>.
9. Synthesis of Cellulose Based Hydrogel With High Absorption Capacity / K. Akatan et al // International Journal of Biology and Chemistry. – 2025. – Vol. 18, № 1. – P. 150-158. <https://doi.org/10.26577/IJBCh202518115>.
10. Synthesis and Application of Biodegradable Cellulose Hydrogels From Sunflower Husks as a Water-Retaining Material in Agriculture / A. Battalova et al // Journal of Polymer Science. – 2025. – Vol. 63, № 24. – P. 5402-5413. <https://doi.org/10.1002/pol.20240486>.
11. Cellulose based materials for controlled release formulations of agrochemicals: a review of modifications and applications / L. Pang et al // Journal of Controlled Release. – 2019. – Vol. 316. – P. 187-199. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2019.11.004>.
12. Mechanisms of solute release from porous hydrophilic polymers / R.W. Korsmeyer et al // International Journal of Pharmaceutics. – 1983. – Vol. 15, № 1. – P. 25-35. [https://doi.org/10.1016/0378-5173\(83\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0378-5173(83)90064-9).

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR24993105).

К.О. Богданова^{1*}, Г.Т. Доланбаева¹, В.Н. Николаева², С.К. Қабдрахманова¹, А.К. Қабдрахманова^{3,4}

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
050013, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Қаныш Сәтбаев көш., 22

²Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті
070002, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., 30-шы Гвардиялық дивизия көш., 34

³«Ғылыми композиттік материалдар орталығы» ЖШС,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Алмалы ауданы, Нұрмақов көш., 79

⁴«TrueScience» ғылыми-зерттеу институты ЖШС,
050054, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Түркісіб ауданы, Тұқай көш., 33

*e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru

СОЯ ТҰҚЫМДАРЫНДА ФУЗИКОКЦИНДІ БАҚЫЛАНАТЫН ЖЕТКІЗУ ҮШІН МЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ КӨПҚАБАТТЫ ПОЛИМЕРЛІ ҚАБЫҚШАНЫ ӨЗІРЛЕУ ЖӘНЕ БАҒАЛАУ

Фитогормондарды қолданудың тиімділігі едәуір дәрежеде олардың жылдам ыдырауымен, тұқым бетіне біркелкі таралмауымен және өну процесі кезінде босап шығуын бақылаудың болмауымен шектеледі. Осы жұмыста соя тұқымдарына фузикоцин (FC) фитогормонын бақыланатын түрде жеткізу үшін минералды толтырғыш (талық) және полисахаридті толтырғыш (картоп крахмалы) қолданылған метилцеллюлоза негізіндегі көпқабатты полимерлі қабықша өзірленіп, зерттелді. Қаптамалардың физика-химиялық сипаттамалары, жағылу біркелкілігі,

деградация кинетикасы және әртүрлі температуралық-ылғалдылық жағдайларында белсенді заттың босап шығуы зерттелді. Метилцеллюлоза мен тальк негізіндегі композициялардың крахмал негізіндегі жүйелермен салыстырғанда механикалық тұрақтылығы жоғары, ісінуге бейімділігі төмен және деградация уақыты ұзақ екені анықталды. FC босап шығуы $0,025 \text{ сағ}^{-1}$ жылдамдық константасымен және 27,8 сағаттық жартылай ыдырау кезеңімен бірінші ретті кинетикаға бағынатыны көрсетілді. Алынған нәтижелер тұқымды себу алдындағы өңдеу технологияларында фитогормондарды ұзақ мерзімді және бақыланатын жеткізу үшін әзірленген метилцеллюлоза-тальк қабықшаларын қолданудың перспективалы екенін растайды. Болашақта бұл деректер тұқымның өну жағдайындағы полимерлі жабындарды зерттеу саласында пайдаланылатын болады.

Түйін сөздер: метилцеллюлоза, фузикоцин, тұқым қабықшасы, бақыланатын босап шығу, тальк, соя

**X.O. Bogdanova^{1*}, G.T. Dolanbayeva¹, V.N. Nikolayeva², S.K. Kabdrakhmanova¹,
A.K. Kabdrakhmanova^{3,4}**

¹K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University,
050013, Republic of Kazakhstan, Almaty, 22 Kanysh Satpayev str.

²Sarsen Amanzholov Higher Kazakhstan University,
070002, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, 30th Guards Division, 34

³LLP «Scientific Center of Composite Materials»,
050000, Republic of Kazakhstan, Almaty, 79 Nurmakova St.

⁴LLP «Scientific Research Institute «TrueScience»
050054, Republic of Kazakhstan, Almaty, 33 Tukaya St., Turksib District

*e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A MULTILAYER METHYLCELLULOSE-BASED POLYMER COATING FOR CONTROLLED DELIVERY OF FUSICOCCIN ON SOYBEAN SEEDS

The effectiveness of phytohormone application is largely limited by their rapid degradation, uneven distribution on the seed surface, and the lack of control over their release during germination. In this study, a multilayer polymer coating based on methylcellulose was developed and investigated for the controlled delivery of the phytohormone fusicoccin (FC) to soybean seeds using a mineral filler (talc) and a polysaccharide filler (potato starch). The physicochemical properties of the coatings, application uniformity, degradation kinetics, and release of the active compound under different temperature and humidity conditions were evaluated. The methylcellulose-talc compositions exhibited higher mechanical stability, lower swelling tendency, and longer degradation time compared with starch-based systems. The release of FC followed first-order kinetics, with a rate constant of 0.025 h^{-1} and a half-life of 27.8 h. The obtained results confirm the potential of the developed methylcellulose-talc coatings for the prolonged and controlled delivery of phytohormones in seed pre-sowing treatment technologies. In the future, these findings may be used in further studies of polymer coatings under seed germination conditions.

Key words: methylcellulose, fusicoccin, seed coating, controlled release, talc, soybean.

Сведения об авторах

Ксения Олеговна Богданова* — докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории коллективного пользования, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9318-6155>.

Гүлсайын Тойкенқызы Доланбаева — докторант, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории коллективного пользования, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0049-1511>.

Валентина Николаевна Николаева — научный сотрудник лаборатории биологии и биотехнологии растений национальной научной лаборатории коллективного пользования, Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8887-7111>.

Сана Канатбековна Кабдрахманова — руководитель Международного Research & Development (R&D) центра передовых функциональных материалов и их композитов кафедры химических процессов и промышленной экологии Казахского национального исследовательского технического университета имени К. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5760-2967>.

Айнур Канатовна Кабдрахманова – заведующая испытательной лабораторией по контролю качества биологических образцов и объектов окружающей среды Международного Research & Development (R&D) центра кафедры химических процессов и промышленной экологии Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: kabdrahmanovaajnur4@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4425-303x>.

Авторлар туралы мәліметтер

Ксения Олеговна Богданова – докторанты, Қ.И. Сәтпаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертхананың өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері, Шығыс Қазақстан университеті Сарсен Аманжолов, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9318-6155>.

Гүлсайын Тойкенқызы Доланбаева – Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Биозкологиялық инженерия – Қоршаған ортаны қорғау технологиясы, докторанты, ұжымдық пайдаланудағы ұлттық ғылыми зертхананың өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері, Шығыс Қазақстан университеті Сарсен Аманжолов, Өскемен қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0049-1511>.

Валентина Николаевна Николаева – Қазақстан Республикасы, Өскемен қаласы, Сарсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, ұжымдық пайдалану ұлттық ғылыми зертханасының өсімдіктер биологиясы және биотехнологиясы зертханасының ғылыми қызметкері; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8887-7111>.

Сана Канатбековна Кабдрахманова – Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасы Озық функционалды материалдар мен олардың композиттері Research & Development халықаралық орталығының жетекшісі, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5760-2967>.

Айнур Канатовна Кабдрахманова – Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Химиялық процестер және өнеркәсіптік экология кафедрасының Халықаралық Research & Development (R&D) орталығының биологиялық үлгілер мен қоршаған орта объектілерінің сапасын бақылау жөніндегі сынақ зертханасының меңгерушісі, Алматы қ., Қазақстан Республикасы; e-mail: kabdrahmanovaajnur4@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4425-303x>.

Information about the authors

Xeniya Olegovna Bogdanova* – doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev, Researcher, Laboratory of Plant Biology and Biotechnology, National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk city, Republic of Kazakhstan; e-mail: bogdanova.xeniya@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9318-6155>.

Gulsaiyn Toikenkyzy Dolanbayeva – doctoral student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Researcher, Laboratory of Plant Biology and Biotechnology, National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, city Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: saia_26@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0049-1511>.

Valentina Nikolaevna Nikolaeva – Researcher at the Laboratory of Plant Biology and Biotechnology of the National Scientific Laboratory of Collective Use, Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: valentina_nn23@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8887-7111>.

Sana Kanatbekovna Kabdrakhmanova — Head of the International Research & Development (R&D) Center for Advanced Functional Materials and Their Composites, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, K. Satpayev Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: skabdrakhmanova@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5760-2967>.

Ainur Kanatbekovna Kabdrakhmanova – Head of the Testing Laboratory for Quality Control of Biological Samples and Environmental Objects, International Research & Development (R&D) Center, Department of Chemical Processes and Industrial Ecology, Satbayev University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: kabdrahmanovaajnur4@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4425-303x>.

*Поступила в редакцию 30.03.2026
Поступила после доработки 04.05.2026
Принята к публикации 14.05.2026*