

ПОЛИМЕРНЫЕ ГЕЛИ

УДК 541.64:536.421

РЕДКОСШИТЫЙ ГИДРОГЕЛЬ С КОМБИНИРОВАННЫМ ВЛАГОУДЕРЖИВАЮЩИМ И ПРОТИВОЭРОЗИОННЫМ ДЕЙСТВИЕМ

© 2021 г. Л. О. Ильясов^{a,*}, И. Г. Панова^a, Н. А. Храбров^a, П. О. Куцев^b,
Н. Г. Лойко^c, Ю. А. Николаев^c, А. А. Ярославов^a

^a Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Химический факультет
119991 Москва, Ленинские горы, Россия

^b Воронежский государственный университет
394018 Воронеж, Университетская пл., 1, Россия

^c Федеральный исследовательский центр “Фундаментальные основы биотехнологии” Российской академии наук
119071 Москва, Ленинский пр., 33, Россия

*e-mail: illeo98@mail.ru

Поступила в редакцию 24.06.2021 г.

После доработки 18.08.2021 г.

Принята к публикации 03.09.2021 г.

Синтезирован новый редкосшитый сетчатый сополимер, состоящий из акриламида, акрилата калия, крахмала и сшивающего агента, бис-акриламида. Физико-химические свойства синтезированного сополимера сопоставлены со свойствами коммерческого сетчатого сополимера акрилата натрия и акриламида, который используется в агротехнологиях в качестве влагоудерживающего агента. Оба сополимера набухают в воде; при набухании на воздухе первый поглощает больше воды, чем второй, при набухании в порах мелкозернистого кварцевого песка наблюдается обратная картина. Водная взвесь легко деформируемых частиц гидрогеля синтезированного сополимера (с концентрацией частиц 1 мас. %) может быть нанесена на поверхность песка путем разбрызгивания, что невозможно реализовать для взвеси упругих слабо деформируемых частиц коммерческого гидрогеля. После высушивания песка с нанесенным на его поверхность синтезированным сополимером формируется покрытие, защищающее песок от действия ветра и воды. Синтезированный сополимер в концентрации до 0.5 мас. % не обладает антимикробным действием в отношении бактерий и дрожжей. По совокупности физико-химических и биологических свойств он может быть рекомендован как мультифункциональный почвенный кондиционер.

DOI: 10.31857/S2308113921060103

ВВЕДЕНИЕ

Водорастворимые полимеры с диссоциирующими на ионы группами – полиэлектролиты широко используются в агротехнологиях, которые применяют в качестве почвенных кондиционеров – материалов для мелиорации почв и повышения их стойкости к эрозии. Спектр применения полиэлектролитов включает: сохранение (улучшение) физических свойств пахотных земель, стабилизацию почвенной структуры, рекультивацию и детоксикацию нарушенных и загрязненных почв, борьбу с опустыниванием, удержание влаги в почве и другое [1–13].

При обработке почвы растворами линейных полимеров на ее поверхности формируется защитное почвенно-полимерное покрытие (корка), предотвращающее механическое разрушение, размывание агрономически ценных почвенных агрегатов, ветровой унос мелкодисперсной пыли [14, 15]. Эффективность защитных покрытий

определяется свойствами обоих компонентов – почвенных субстратов и полимерных связующих. Полимерные стабилизаторы амфифильной (двойственной) природы, проявляющие сродство к гидрофильным и гидрофобным участкам на поверхности почвенных частиц, имеют выраженное преимущество перед традиционными полиэлектролитами [16–18].

Линейные полимеры слабо связывают воду; обработка почвы такими полимерами не оказывает заметного влияния на ее влагоудерживающие свойства [19, 20]. Для улучшения водного режима почвы применяют ковалентно-сшитые полиэлектролиты с трехмерной сетчатой структурой и высоким содержанием способных к ионизации функциональных групп [11–13, 21]. Набухшие в воде сетчатые полимеры (гидрогели) аккумулируют большое количество воды, что может быть использовано для устранения нехватки пресной воды в сельском хозяйстве, повышения

плодородия почвы и экономии природных ресурсов [22–24]. Способность поглощать и удерживать значительное количество воды и водных растворов в объеме набухшей сетки, адсорбировать ионы металлов и биологически активные соединения делает гидрогели уникальными материалами для множества агротехнических приложений [25, 26].

В последние годы возрастает интерес к синтезу новых почвенных кондиционеров на основе полиэлектролитов, причем особое внимание уделяется полимерам природного происхождения, которые способны деструктурировать под действием почвенных микроорганизмов и ферментов [27–29]. Однако в большинстве работ обсуждаются традиционные кондиционеры, выполняющие какую-либо одну основную функцию: влагоудерживающую либо структурообразующую, и практически не рассматриваются почвенные кондиционеры, решающие обе эти задачи. Между тем объединение обеих функций в одном препарате привлекательно с нескольких точек зрения: уменьшения “химического” (часто неоднозначного) воздействия на почву, упрощения процедуры нанесения кондиционера, возможности количественного контроля физико-химического поведения полимерного носителя и инкапсулированных биологически активных веществ и, как следствие, удешевления технологии использования полимерных кондиционеров.

В настоящей работе проведен синтез анионного редкосшитого сополимера, содержащего био-разлагаемые фрагменты крахмала (сополимер I), набуханием сополимера в водно-солевом растворе получен гидрогель, исследованы влияние гидрогеля на влагоудерживающие свойства кварцевого песка – основного компонента большинства видов почв и противозерозионные свойства защитных полимерно-песчаных корок, а также сопоставлены физико-химические свойства синтезированного гидрогеля со свойствами коммерческого гидрогеля на основе анионного трехмерного сополимера (сополимер II). В дополнение к этому, выполнена оценка токсичности синтезированного сополимера по отношению к почвенным бактериальным и дрожжевым культурам.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали без дополнительной очистки акриловую кислоту, гидроокись калия и персульфат калия фирмы “Вектон” (Россия), акриламид (AM) и сшиватель *N,N*-метилен-*bis*-акриламид компании “Acros Organics” (США), крахмал (“Вектон”), гидрофосфат и дигидрофосфат натрия фирмы “Химмед” (Россия). Мелкозернистый кварцевый песок с размером частиц 0.1–0.2 мм (“ОРТ-6”, Россия) перед применением

многократно промывали бидистиллированной водой.

Анионный редкосшитый сополимер I синтезировали по следующей методике. Растворяли 5.5 г крахмала в 30 мл дистиллированной воды при температуре 80°C и при постоянном перемешивании добавляли 10 мл 11 мас. % раствора персульфата калия для инициирования прививочной полимеризации смеси акриловая кислота–AM–*bis*-акриламид [30, 31]. Смесь, состоящую из 79.8 мл 98.5 мас. % раствора акриловой кислоты, 20.9 г AM, 0.055 г *bis*-акриламида и 85 мл 75.7 мас. % раствора KOH, готовили на ледяной бане, затем нагревали до 70°C и приливали к раствору крахмала и персульфата калия. Полученный раствор перемешивали при 60–70°C до появления гель-эффекта (через 20–30 мин), после чего нагревание прекращали. Далее сополимер I сушили в токе воздуха при температуре 50°C до постоянной массы. Высушенный сополимер измельчали и делили на фракции с размером частиц меньше 0.25 мм (фракция I) и в диапазоне 0.25–0.50 мм (фракция II), последовательно пропуская порошок сополимера через сита с размером ячеек 0.25 и 0.50 мм. Массовое соотношение компонентов AM : акриловая кислота : крахмал : сшиватель в сополимере составило приблизительно 14 : 83 : 3 : 0.036. Полученный сополимер хранили при температуре 5°C.

В работе использовали также коммерческий сополимер акриламида и акрилата калия с размером гранул 0.3–0.5 мм – сополимер II.

Содержание карбоксильных групп в сополимерах I и II определяли потенциометрически. Для этого готовили 0.1 мас. % взвеси набухших сополимеров в 0.01 моль/л водном растворе соляной кислоты с pH 2 и выдерживали их в течение недели при постоянной температуре до достижения равновесного состояния. Полученные взвеси титровали 0.1 моль/л раствором NaOH на pH-метре “Аквилон pH-420” (Россия). Содержание карбоксильных групп в сополимерах I и II составило 6.4×10^{-3} и 2.2×10^{-3} моль/г соответственно.

Равновесную степень свободного набухания сополимеров α определяли при различных pH гравиметрическим методом с помощью анализатора влажности “Shimadzu MOC-63U” (Япония); 0.05 г сополимера помещали в 100 мл бидистиллированной воды и выдерживали в течение трех суток до полного набухания. Затем pH гидрогелевых взвесей доводили до нужного значения, добавляя 0.01 моль/л раствор HCl или 0.01 моль/л раствор NaOH, и выдерживали взвеси при перемешивании в течение трех суток для достижения равновесного состояния. Величину α рассчитывали по соотношению

$$\alpha = (G_b - G) / G, \quad (1)$$

где G_b – масса гидрогеля, равновесно набухшего в воде при комнатной температуре; G – масса сухого сополимера.

Для оценки степени набухания сополимеров после их связывания с песком и исследования влияния сополимеров на способность песка удерживать влагу образцы готовили следующим образом. Навеску сополимера добавляли к 20 г песка и тщательно перемешивали. Массовое соотношение песок : полимер в образцах варьировали в диапазоне от 100 : 0.1 до 100 : 1. Смеси песок–полимер насыпали в пластиковые стаканы с небольшими отверстиями на дне, прикрытыми фильтровальной бумагой; стаканы с образцами помещали в емкость, наполненную 0.001 моль/л фосфатным буфером с pH 6.5, и выдерживали в течение трех суток для равновесного насыщения образцов влагой. Влажность смесей песок–сополимер при максимальном насыщении влагой оценивали по формуле

$$W = (M_b - M_{п.} - G) / M_{п.} \quad (2)$$

Здесь M_b – масса влажной смеси песок–сополимер, $M_{п.}$ – масса сухого песка. Полученный результат сравнивали с влажностью исходного песка при максимальном насыщении влагой, рассчитанной как

$$W = (M_{в.п.} - M_{п.}) / M_{п.}, \quad (3)$$

где $M_{в.п.}$ – масса влажного песка.

Степень набухания сополимеров в песке (в ограниченном поровом пространстве субстрата) рассчитывали по формуле

$$W = (M_b - M_{в.п.} - G) / G \quad (4)$$

Влажность измеряли гравиметрическим методом на анализаторе влажности “Shimadzu MOC-63U” (Япония).

Кривые влагоудержания для исходного песка и смеси песок–полимер получали путем равновесного центрифугирования, как описано ранее в работах [32, 33]. Результаты перестраивали в координатах $\lg P - W$ (P – внешнее давление, создаваемое вращением центрифуги) и проводили аппроксимацию данных, используя модель ван Генухтена [34], которая описывает S -образные зависимости $\lg P - W$ с одним перегибом и минимальным количеством параметров аппроксимации.

Вязкость 1 мас. % взвесей гидрогеля I определяли с помощью капиллярных вискозиметров ВПЖ-2 (“Экросхим”, Россия) с диаметром капилляра 1.77 и 2.37 мм.

Образцы с защитным полимерно-песчаным слоем на поверхности готовили следующим образом. В пластиковые контейнеры помещали 60 г кварцевого песка; толщина слоя песка составляла 5 см, площадь поверхности образца 16 см². С по-

мощью пульверизатора на поверхность наносили 1 мас. % взвеси гидрогеля I в воде с нормой расхода 2 л/м². Образцы сушили до постоянной массы на воздухе. Прочность полимер-песчаной корки измеряли пенетрационным методом (погружением конуса) с использованием конического пластометра Ребиндера [35].

Для противоэрозионных экспериментов в чашку Петри вносили 80 г кварцевого песка; толщина слоя песка составляла 1 см, площадь поверхности образца 16 см². На песок равномерно наносили 17.2 мл 1 мас. % взвеси полимерного гидрогеля в воде с нормой расхода 2 л/м² и сушили на воздухе до постоянной массы. Контрольные образцы готовили путем аналогичной обработки поверхности песка бидистиллированной водой. Стабильность образцов к ветровой эрозии изучали путем воздействия на них потока воздуха, генерируемого с помощью электрического фена “BaBylissPRO BAB7000IE” (“Babyliss”, Франция); скорость воздушного потока устанавливали с помощью анемометра “Testo 440” (“Testo”, Германия). Чашку Петри с образцом располагали горизонтально; поток воздуха направляли под углом 30° с расстояния 5 см в течение 5–30 мин.

Для оценки водостойкости песка до и после нанесения на него полимера образцы обрабатывали водой из пульверизатора в импульсном режиме на протяжении 10 мин. Чашки Петри помещали под углом 45°, потоки воды направляли на них горизонтально; общий объем нанесенной воды составлял 500 мл. Образцы взвешивали после обработки водой и последующей сушки, затем рассчитывали потерю массы образца.

Антимикробную активность гидрогеля I оценивали по стандартной методике определения минимальной ингибирующей концентрации (МИК) [36]. Тест-культурами служили грамотрицательные бактерии *Pseudomonas aeruginosa* 4.8.1, грамположительные бактерии *Staphylococcus aureus* и дрожжи *Yarrowia lipolytica* 367-2 из коллекции Федерального исследовательского центра “Фундаментальные основы биотехнологии” РАН. Микроорганизмы выращивали на среде М9 следующего состава (г/л): Na₂HPO₄ – 6, KH₂PO₄ – 3, NaCl – 0.5, NH₄Cl – 0.2, MnSO₄ – 0.0004, MgSO₄ – 0.0025, CaCl₂ – 0.0002, глюкоза – 10; среда имела pH 7.0. Выращивание осуществляли в присутствии различной концентрации гидрогеля I при постоянном перемешивании и температуре 28°C в течение двух суток. Рост культур оценивали визуально по возрастанию мутности растворов. Максимальная концентрация сополимера составляла 0.5 мас. % или 3.2×10^{-3} моль/л анионных групп.

Все эксперименты проводили с 3-кратным повтором. Статистические данные получали путем

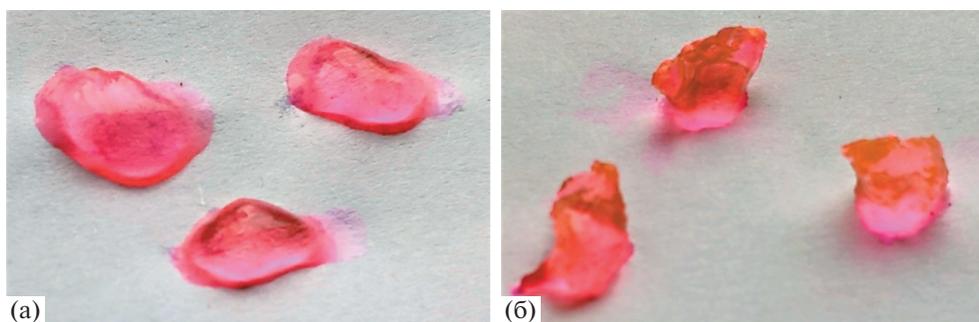


Рис. 1. Фото набухших в воде частиц сополимера I, фракция II (а) и сополимера II (б). Гидрогели обработаны раствором красного красителя, родамина 6Ж.

обработки экспериментальных данных в программе Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При смешивании с водой оба сетчатых сополимера – синтезированный в настоящей работе I и коммерческий II – набухали, формируя прозрачные взвеси гидрогеля. Фотографии на рис. 1 дают наглядное представление о состоянии частиц синтезированного и коммерческого сополимеров после набухания. Для лучшей визуализации бесцветные гидрогелевые частицы были подкрашены красным красителем родамином 6Ж, распределенным в объеме частиц. Набухшие частицы сополимера I растекались по поверхности стекла, формируя на нем капли высотой 2 мм (рис. 1а). В отличие от этого, сополимер II после набухания давал частицы геля высотой 4 мм (рис. 1б).

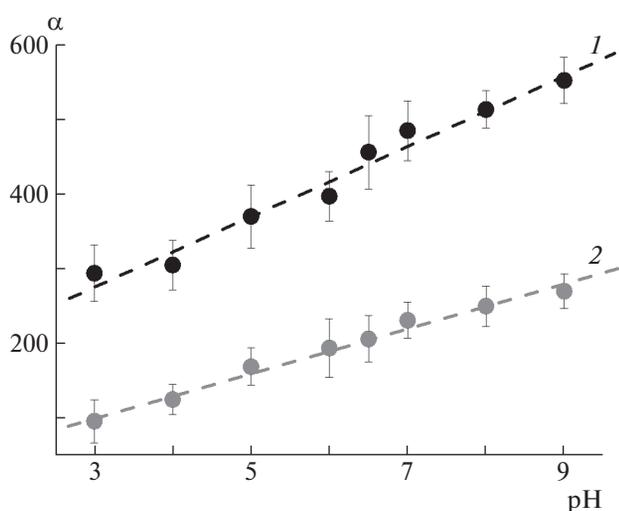


Рис. 2. Зависимость равновесной степени набухания α сополимера I (1) и сополимера II (2) от pH водного бессолевого раствора.

Зависимость степени набухания сополимеров α от pH водного раствора при комнатной температуре представлена на рис. 2. Видно, что степень набухания возрастает для обоих сополимеров при увеличении pH раствора с 3 до 9, отражая прогрессивное увеличение степени диссоциации карбоксильных групп в составе гидрогелей [37, 38].

После распределения сополимеров в песке гранулы оказывались внутри пор ограниченного объема, что могло повлиять на способность полимеров к набуханию. Объемная доля пор в мелкозернистом кварцевом песке с размерами частиц 0.1–0.2 мм (ОРТ-6, РФ) была определена ранее в работе [39]. Диаметры пор находились в диапазоне от 0.01 до 0.2 мм с выраженным максимумом распределения по размерам при 0.02 мм. Для оценки набухания сополимеров в ограниченном поровом пространстве был использован водный буферный раствор с pH, близким к нейтральному. На рис. 3 представлены степени набухания сополимеров I и II в свободном состоянии (α) и в песке ($\alpha_{\text{огр}}$). На рисунке видно, что набухание сополимера I в песке ($\alpha_{\text{огр}} = 70$) значительно ниже, чем в свободном состоянии ($\alpha = 440$), что связано с пространственными ограничениями сополимера в порах субстрата и сопротивлением со стороны частиц песка. Напротив, степень набухания сополимера II при переходе от свободного состояния к песку уменьшалась всего лишь на 15%: с $\alpha = 206$ до $\alpha_{\text{огр}} = 175$. Таким образом, при отсутствии внешних ограничений большую степень набухания имел сополимер I: 440 против 206 для сополимера II; в то время как в ограниченном поровом пространстве лучше набухал сополимер II: $\alpha_{\text{огр}} = 175$ против 70 для сополимера I. Иными словами, при замене внешней среды прослеживалась инверсия в способности сшитых полимеров к набуханию.

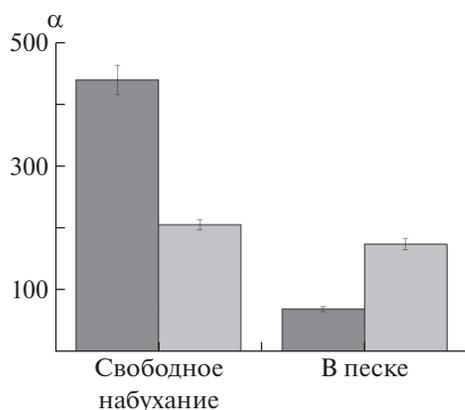


Рис. 3. Степень набухания сополимера I (темные прямоугольники) и сополимера II (серые прямоугольники) в свободном состоянии и в песке; образцы насыщены 0.001 моль/л фосфатным буфером с рН 6.5. Указаны усредненные величины α для содержания гидрогеля в песке 0.2–1.0 мас. % в случае сополимера I и 0.1–0.3% в случае сополимера II.

Влияние полимерных гидрогелей на влагоудерживающую способность песка

S-образные кривые водоудерживания для исходного кварцевого песка и песка с полимерными гидрогелями, аппроксимированные в соответствии с моделью ван Генухтена [34], показаны на рис. 4. Они отражают основную гидрофизическую характеристику почвы – взаимосвязь между давлением почвенной влаги $\lg P$ и влажностью W . Чем выше показатель W при одном и том же значении $\lg P$, тем выше способность песка накапливать и удерживать воду. Кривые водоудерживания для исходного песка (кривые 1) содержат три участка. При низких значениях скорости центрифугирования (т.е. при низких значениях давления) влагоудерживание сохраняется на исходном уровне с $W = 27\%$ (область I), повышение скорости центрифугирования сверх некоторой критической (ей соответствует $\lg P = 1.5–2.0$) приводит к резкому уменьшению W (область II), после чего W плавно уменьшается с ростом $\lg P$ (область III). Такой же профиль характерен и для кривых водоудерживания песка, насыщенного полимерными гидрогелями (кривые 2–4), с той разницей, что границы между областями размываются и S-образная форма кривых сглаживается.

Особый интерес представляют точки пересечения кривой водоудерживания с секущими, представленными уравнениями $\lg P = 2.17 + W/100$ и $\lg P = 4.18$. Пересечение первой секущей с кривой водоудерживания дает наименьшую влагоемкость образца (НВ), пересечение второй – влажность, не доступную для растений (так называемую влажность завядания – ВЗ) [40]. Разница между этими величинами определяет одну из важных почвенно-гидрофизических констант –

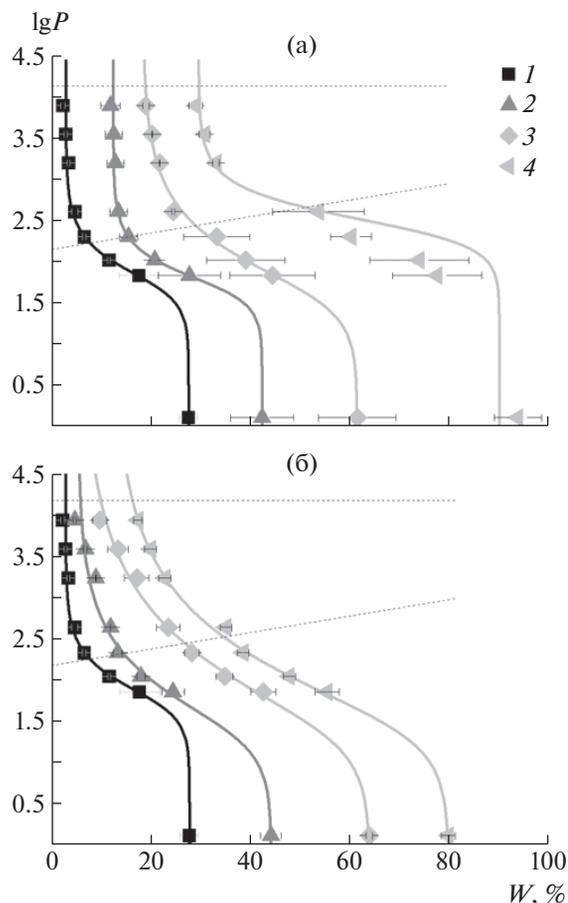


Рис. 4. Кривые водоудерживания для песка с различным содержанием сополимера I (а) и сополимера II (б). а – Содержание сополимера I 0 (1), 0.2 (2), 0.5 (3) и 1.0 мас. % (4); б – содержание сополимера II 0 (1), 0.1 (2), 0.2 (3) и 0.3 мас. % (4). Образцы насыщены 0.001 моль/л фосфатным буфером с рН 6.5.

диапазон влажности, доступной для растений $\text{ДДВ} = \text{НВ} - \text{ВЗ}$.

Введение в песок сополимеров I и II оказывало заметное влияние на профили кривых водоудерживания (рис. 4). Оба полимера смещали кривые водоудерживания вправо, что отражало способность полимерных гидрогелей запасать и удерживать воду, причем осязаемое количество воды сохранялось в смеси песок–гидрогель даже при максимальном значении $\lg P$ (3.94), которое соответствовало приложенному давлению 850 кг/см^2 . Сополимер II выступал как более эффективный абсорбент воды: одинаковые значения влажности W достигались при меньшем содержании этого полимера, чем сополимера I (ср. рис. 4а и 4б).

Результаты анализа кривых водоудерживания для песка и полимерно-песчаных смесей суммированы в табл. 1, в которой помимо упоминавшихся выше констант НВ, ВЗ и ДДВ приведена максимальная влагоемкость образцов W_s до цен-

Таблица 1. Почвенно-гидрологические константы песка с различным содержанием сополимеров I и II

Содержание сополимера в песке, мас. %	Почвенно-гидрологическая константа, %			
	<i>Ws</i>	НВ	ВЗ	ДДВ
0	27	4	1	3
		Сополимер I		
0.2	43	16	12	4
0.5	62	29	19	10
1.0	91	52	30	21
		Сополимер II		
0.1	44	15	6	9
0.2	64	27	10	17
0.3	80	35	16	19

трифугирования, т.е. до приложения внешнего давления. В песке при достаточно высокой максимальной влажности $Ws = 27\%$, наименьшая влагоемкость не превышала 4%, а влажность завядания – 1%. Диапазон доступной растениям влаги для песка составлял лишь $ДДВ = НВ - ВЗ = 3$ мас. %.

Эти показатели претерпевали существенные изменения при добавлении к песку набухающих сополимеров. С увеличением доли сополимера в смеси с песком наблюдалось увеличение всех показателей, в том числе основной характеристики влагоудержания почв – диапазона доступной влажности. Ранее авторами работы [41] было показано, что для агрегированных плодородных почв суглинистого состава характерно значение диапазона доступной влаги около 16%. Этот критерий позволяет считать оптимальными полимерно-песчаные смеси с содержанием сополимера I 0.8 мас. % и содержанием сополимера II 0.2 мас. %.

Структурообразующие свойства полимерных гидрогелей

Защитные противозерозионные покрытия на грубозернистых грунтах (почвах) формируются путем разбрызгивания водных полимерных рецептур по обрабатываемой поверхности; оптимальным считается использование 1–2 мас. % растворов для полимеров линейной структуры с нормой расхода 1–3 л/м² [16, 18, 19]. Вязкость 1 мас. % водной взвеси сополимера I, измеренная методом проточной вискозиметрии, составила 32 мм²/с для фракции I с размером сухих частиц менее 0.25 мм и 53 мм²/с для фракции II с размером сухих частиц 0.25–0.50 мм. Такие взвеси легко проходили по капилляру вискозиметра диаметром 2.37 мм; их можно было наносить на поверхность разбрызгиванием, что, очевидно, было

связано с низкими механическими характеристиками набухших частиц сополимера I, которые легко деформировались и даже частично разрушались при прохождении через мелкие отверстия pulverизатора. Напротив, гранулы сополимера II – как исходные с размером 0.3–0.5 мм, так и полученные после их измельчения до размера менее 0.25 мм – формировали в воде упругие гидрогелевые частицы, размер, модуль упругости и прочность которых не позволяли им проходить через 2.37 мм капилляр. Такая взвесь не проходила через отверстия pulverизатора, и ее нельзя было нанести на поверхность песка разбрызгиванием.

Обработка песка 1 мас. % водной взвесью сополимера I (фракция I) при норме расхода 2 л/м² привела к формированию сплошного полимерно-песчаного покрытия (корки); толщина корки составляла 5–6 мм. Фотография такой корки после ее отделения от песчаной основы приведена на рис. 5а. Водная взвесь сополимера II равномерно распределялась по поверхности песка шпателем, что сопровождалось слипанием исходных набухших частиц, но не приводило к формированию сплошной корки, как это продемонстрировано на рис. 5б.

Механическая прочность покрытия, сформированного на песке после нанесения водной рецептуры на основе сополимера I, определенная пенетрационным методом на пластометре Ребиндера [35], составила 106 ± 22 мПа. Прочность полимерно-песчаной композиции, сформированной сополимером II, была минимальной и сопоставимой с прочностью неструктурированного песка.

Исходный песок и песок, обработанный 1 мас. % водными взвесями обоих сополимеров, были протестированы на предмет устойчивости к действию потоков воздуха, создаваемых электрическим феном (рис. 6). В контрольном эксперимен-

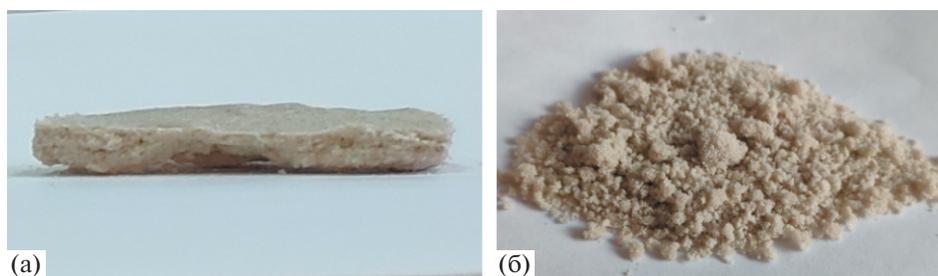


Рис. 5. Фото композиционных полимерно-песчаных структур, сформированных на поверхности песка после обработки 1 мас. % водной взвесью сополимера I (а) и сополимера II (б).

те исходный песок наносился в чашку Петри и на него направлялся воздушный поток со скоростью 40 км/час. Потеря песка 100% была зарегистрирована спустя 5 с после начала обдува. Обработанный сополимером II песок (рис. 6б) практически полностью удалялся из чашки Петри после 5 мин воздействия воздушного потока со скоростью 40 км/ч (рис. 6г). Выраженную устойчивость показала корка из песка и сополимера I (рис. 6а), которая сохраняла целостность при 30-минутном обдуве воздушным потоком со скоростью 76 км/ч (рис. 6в).

В дополнение к этому была исследована водостойкость покрытий, сформированных на поверхности песка сополимерами I и II (рис. 7). В контрольном эксперименте было показано, что

10-минутная обработка водой приводит к 100% вымыванию песка из чашки Петри. Корка из песка и сополимера I (рис. 7а) при обработке водой быстро набухала и превращалась в желеобразное покрытие, которое полностью блокировало вымывание песка (рис. 7в). В отличие от этого, обработанный сополимером II (рис. 7б), легко размывался водой и вытекал из чашки Петри (рис. 7г).

Влияние сополимера I на жизнеспособность микроорганизмов

Влияние сополимера I на жизнеспособность микроорганизмов было проверено с помощью стандартной методики определения минимальной ингибирующей концентрации [36]. Для чего тест-культуры: грамотрицательные бактерии *Pseu-*

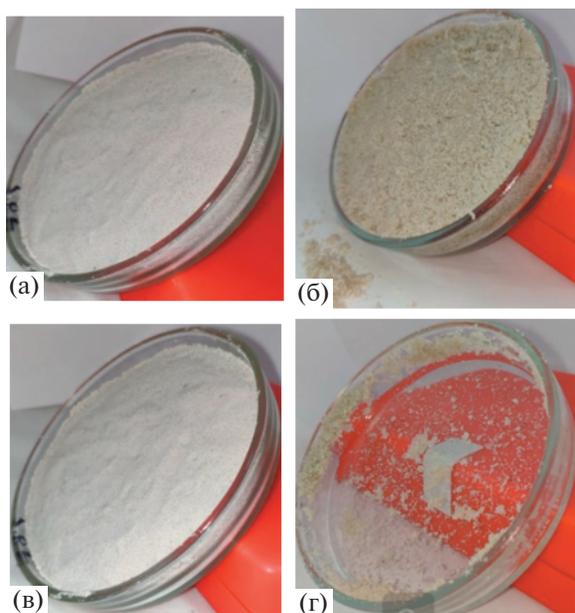


Рис. 6. Полимерно-песчаные композиции из сополимера I (а) и сополимера II (б); в – покрытие из песка и сополимера I после воздействия ветра со скоростью 76 км/ч; г – образец из песка и сополимера II после воздействия ветра со скоростью 40 км/ч. Пояснения в тексте.

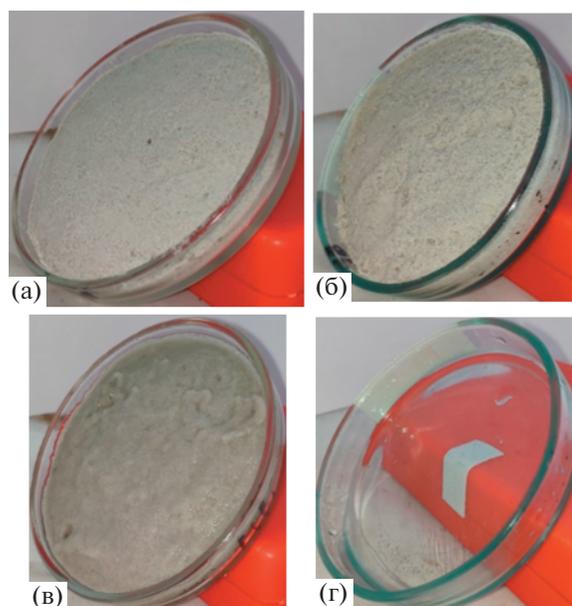


Рис. 7. Полимерно-песчаные композиции из сополимера I (а) и сополимера II (б), а также после их обработки водой соответственно (в, г). Пояснения в тексте.

domonas aeruginosa 4.8.1, грамположительные бактерии *Staphylococcus aureus* 209P и дрожжи *Yarrowia lipolytica* 367-2 были выращены в присутствии разной концентрации сополимера I. Максимальное содержание сополимера I в среде составляло 0.5 мас. %. Во всех случаях наблюдался рост микроорганизмов, сопоставимый с контрольным. Это указывает на то, что сополимер I в исследованном диапазоне концентрации 0.1–0.5% не обладает антимикробными свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована способность к набуханию синтезированного и коммерческого сетчатых полиэлектролитов в свободном состоянии (на воздухе) и в условиях ограниченного объема (после распределения в мелкодисперсном песке). На воздухе большую степень набухания демонстрировал редкосшитый сополимер I, в ограниченном поровом пространстве песка – сополимер II. Оба сополимера при норме внесения ~0.2–0.8 мас. % повышали диапазон доступной для растений влаги в песке (песчаной почве) до уровня, соответствующего хорошо агрегированным плодородным суглинистым почвам.

В водной среде сополимер I формировал легко деформируемые частицы гидрогеля; полученная взвесь наносилась на поверхность песка разбрызгиванием. Сформированное защитное покрытие обладало высокой прочностью в сухом состоянии, а при обработке водой набухало и образовывало желеобразный слой на поверхности почвы, который не размывался водой. Сополимер I не угнетал рост бактерий и дрожжевых клеток. Полученные результаты полезны для интерпретации поведения редкосшитых гидрогелей в ограниченном поровом пространстве почвы и для разработки экологических почвенных кондиционеров с комбинированным водосберегающим и структурирующим действием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-29-05036 мк).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хабиров И.К., Сайфуллин Р.Р. // Изв. Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2018. Т. 6. № 74. С. 8.
2. Королев А.А. // Зерновое хозяйство. 2007. № 6. С. 16.
3. Кузин Е.Н., Кузина Е.Е. Изменение плодородия серой лесной почвы и продуктивности зерновых культур под действием химической и биологической мелиорации. Пенза: РИО ПГСХА, 2010.
4. Sojka R.E., Bjorneberg D.L., Entry J.A., Lentz R.D., Orts W.J. // Adv. Agron. 2007. V. 92. P. 75.
5. Bouranis D.L., Theodoropoulos A.G., Drassopoulos J.B. // Commun. Soil Sci. Plant. Anal. 1995. V. 26. № 9–10. P. 1455.
6. Bimendina L.A., Yashkarova M.G., Orazzhanova L.K., Kudaibergenov S.E. // Eur. Chem. J. 2005. V. 7. № 2. P. 139.
7. Голядкина И.В., Панков Я.В. // Усп. соврем. естествозн. 2016. № 6. С. 75.
8. Панков Я.В., Кондратьев В.Н., Голядкина И.В. // Лесотехнический журн. 2012. № 4. С. 148.
9. Кубенкулов К.К., Наушабаев А.Х. // Гидрометеорология и экология. 2012. № 1. С. 98.
10. Zang Y.-X., Gong W., Xie H., Liu B.-L., Chen H.-L. // Environ. Technol. Rev. 2015. V. 4. № 1. P. 119.
11. Данилова Т.Н., Минникова Т.В., Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В., Колесников С.И., Якушев В.В. // Агрофизика. 2018. № 1. С. 1.
12. Годунова Е.И., Гундырин В.Н. // Достижения науки и техники АПК. 2015. Т. 29. № 5. С. 57.
13. Gilbert C., Peter S., Wilson N., Edward M., Francis M., Sylvester K., Erick B. // Open J. For. 2014. V. 04. № 01. P. 34.
14. Zezin A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva V.B., Zansokhova M.F., Sybachin A.V., Yaroslavov A.A. // Adv. Coll. Int. Sci. 2015. V. 226. P. 17.
15. Tingle J.S., Newman J.K., Larson S.L., Weiss C.A., Rushing J.F. // Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. 2007. V. 1989–2. № 1. P. 59.
16. Panova I.G., Khaydapova D.D., Ilyasov L.O., Umarova A.B., Yaroslavov A.A. // Coll. Surf. A. 2020. V. 590. P. 124504.
17. Karol R.H. Chemical Grouting and Soil Stabilization. New York: Taylor & Francis, 2003.
18. Panova I.G., Ilyasov L.O., Khaidapova D.D., Ogawa K., Adachi Y., Yaroslavov A.A. // Polymer Science B. 2020. V. 62. № 5. P. 491.
19. Panova I.G., Ilyasov L.O., Khaidapova D.D., Bashina A.S., Smagin A.V., Ogawa K., Adachi Y., Yaroslavov A.A. // Coll. Surf. A. 2021. V. 610. P. 125635.
20. Кульман А. Искусственные структурообразователи почвы. М.: Колос, 1982.
21. Abobatta W. // Adv. Agric. Environ. Sci. Open Acc. 2018. V. 1. № 2. P. 59.
22. Lentz R.D. // Agronomy J. 2020. V. 112. № 4. P. 2569.
23. Bhardwaj A.K., Shainberg I., Goldstein D., Warrington D.N., Levy G.J. // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 71. № 2. P. 406.
24. Kabir S.M.F., Sikdar P.P., Haque B., Bhuiyan M.A.R., Ali A., Islam M.N. // Prog. Biomater. 2018. V. 7. № 3. P. 1.
25. Рабаданов Р.Г. // Аграрная Россия. 2017. № 6. С. 15.
26. Zhao B., Jiang H., Lin Z., Xu S., Xie J., Zhang A. // Carbohydr. Polym. 2019. V. 224. P. 115022.
27. Michalik R., Wandzik I. // Polymers (Basel). 2020. V. 12. № 10. P. 1.
28. Nnadi F., Brave C. // J. Soil Sci. Environmental Manag. 2011. V. 2. P. 206.
29. Ramli R.A. // Polym. Chem. 2019. V. 10. № 45. P. 6073.
30. Bao Y., Ma J., Li N. // Carbohydr. Polym. 2011. V. 84. № 1. P. 76.

31. Кузнецов В.А., Селеменев В.Ф., Семенов В.Н., Бакалова М.В. Пат. 2574722 Россия. 2016.
32. Smagin A. // Euras. Soil Sci. 2003. V. 36. P. 301.
33. Smagin A.V., Sadovnikova N.B., Nikolaeva E.I. // Euras. Soil Sci. 2014. V. 47. P. 78.
34. van Genuchten M.T. // Soil Sci. Soc. Am. J. 1980. V. 44. P. 892.
35. Хайдапова Д.Д., Пестонова Е.А. // Почвоведение. 2007. Т. 11. С. 1330.
36. Andrews J.M // J. Antimicrob. Chemotherapy. 2001. V. 48. № 1. P. 5.
37. Дубровский С.А., Казанский К.С. // Высокомолек. соед. Б. 1993. Т. 35. № 10. С. 1712.
38. Филиппова О.Е. // Высокомолек. соед. С. 2000. Т. 42. № 12. С. 2328.
39. Smagin A., Panova I., Plyasov L., Ogawa K., Adachi Y., Yaroslavov A. // J. Appl. Polym. Sci. 2021. V. 138. № 31. P. 5075440.
40. Воронин А.Д. Структурнофункциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во МГУ, 1984.
41. Шейн Е.В., Карпачевский Л.О. Теории и методы физики почв. М.: Гриф и К, 2007.