

БИОРАЗЛАГАЕМАЯ КОМПОЗИЦИОННАЯ ПОЛИЭТИЛЕНОВАЯ ПЛЕНКА

Т.В. Шевченко, Ю.В. Устинова, А.М. Попов, Е.Д. Мельникова

Кемеровский государственный университет

Представлены результаты исследований по созданию биоразлагаемых полимерных пленок с использованием пористых материалов различной химической природы – пористых алюмосиликатных микросфер, извлеченных из золы уноса, образующейся при сжигании угля, и пористого окисленного каменного угля, которые предварительно пропитывались растворами сахара. Лабораторная технология основана на соединении горячим способом двух пленок, между которыми предварительно помещался наполнитель, пропитанный раствором сахара. Предлагаемая технология получения биоразлагаемых пленок предполагает использование промышленных аппаратов, таких как экструдер, каландр и др. С помощью натуральных испытаний доказано резкое снижение времени их деструкции в природных условиях благодаря активации почвенных бактерий, способных разрушать полимерные композиции. Предложен вариант промышленной технологии ускоренного разрушения использованных пленок микробиологическим способом на специальных полигонах.

Ключевые слова: полимерные пленочные композиционные материалы, алюмосиликатные микросферы, окисленный каменный уголь, раствор сахара, почвенные бактерии, промышленная технология производства, деструкция пленочных материалов

Biodegradable Composite Polyethylene Film

T.V. Shevchenko, Yu.V. Ustinova, A.M. Popov, E.D. Mel'nikova

Kemerovo State University, 650000 Kemerovo, Russia

The results of research on the creation of biodegradable polymer films using porous materials of various chemical nature - porous aluminosilicate microspheres extracted from fly ash formed during the combustion of coal and porous oxidized coal, which are pre-saturated with sugar solutions, are presented. Laboratory technology is based on a hot-mix of two films, between which a filler pre-impregnated with a solution of sugar was previously placed. The proposed technology for obtaining biodegradable films involves the use of industrial devices, such as an extruder, calender, etc. With the help of field tests, a sharp decrease in the time of their destruction under natural conditions due to the activation of soil bacteria capable of destroying polymer compositions has been proved. A version of the industrial technology of accelerated destruction of used films by the microbiological method at special test sites is proposed.

Keywords: polymer film composite materials, aluminosilicate microspheres, oxidized coal, sugar solution, soil bacteria, industrial production technology, destruction of film materials

DOI: 10.18412/1816-0395-2019-02-24-29

Для успешного развития отечественной промышленности в настоящее время, в период 6-го технологического уклада, необходимо совершенствование отечественных базовых экологических технологий по рациональному природопользованию и эффективной переработке бытовых и промышленных отходов, перечень которых официально обозначен правительством РФ в своих документах [1].

Значительный вклад в загрязнение водного бассейна и

земельных угодий вносят отходы бывших в употреблении полимерных пленок на основе полиолефинов. Эти материалы благодаря своим особым физико-химическим свойствам (эластичность, влагонепроницаемость, морозостойкость, гигиеничность и др.) широко используются в различных отраслях промышленности в качестве удобного упаковочного, укрывного или технологического материала. Однако эффективная технология утилизации отработанных или ранее

использованных полимерных пленок в настоящее время отсутствует. Поэтому во всех промышленно развитых странах из-за высокой биологической и химической стойкости полимерных пленочных отходов, время разрушения которых в природных условиях составляет несколько десятков лет, при отсутствии их целевой переработки наблюдается стремительное неуправляемое загрязнение окружающей среды, наносящее ей непоправимый ущерб.

Снижения остроты такой экологической проблемы можно достичь при разработке технологии изготовления пленочного материала за счет внесения изменений в химический состав полимерных пленок, вводя в них биоразлагаемые компоненты и создавая при этом благоприятные условия для микробиологического разрушения полимеров в природных условиях [2]. Создание таких биоразлагаемых полимеров, время распада которых при захоронении в почве значительно ниже (около 1 года) по сравнению с традиционными полимерами, является основным направлением развития современного полимерного материаловедения.

Исследования промышленных способов получения биополимеров начались еще в конце 80-х годов прошлого века в Италии компанией Novamont S.p.a. Сегодня она располагает заводом биоразлагаемых полимерных продуктов с использованием крахмала мощностью 60 тыс. т в год. В Германии работают фирмы Biotec (20 тыс. т в год) и ВЮР Biopolymer Technologies (3,5 тыс. т в год). Последняя организация торгует дополнительно лицензиями на собственную технологию получения биопластиков. В Голландии базируется компания Rodenburg Biopolymers мощностью 40 тыс. т. В США крупным производителем таких материалов является фирма Cereplast Inc. При анализе патентной информации по выпускаемым биоразлагаемым материалам установлено, что биоразложение осуществляется, в основном, за счет введения в полимерную основу углеводов различного состава. В роли таких наполнителей используют крахмал, целлюлозу, льняную костру, лузгу подсолнечника, полосу пшеницы, солому злаковых, древесные опилки и другие промышленные или сельскохозяйственные отходы [3–8]. Известны и тройные композиции, в которые кроме перечисленных составляющих (полимеры и наполнитель) входит технологическая добавка, улучшающая совместимость полимера и на-

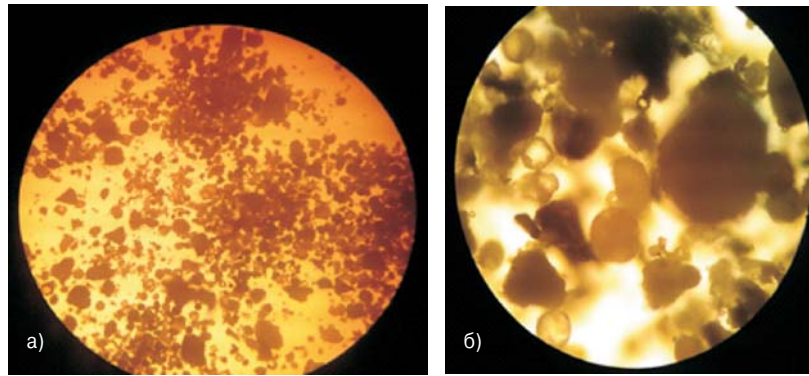


Рис. 1. Зола уноса Кемеровской ТЭЦ при увеличении $\times 10$ (а) и $\times 40$ (б)
Fig. 1. Fly ash of the Kemerovo CHP with an increase of $\times 10$ (a) and $\times 40$ (b)

полнителя. Так, известен способ производства биоразлагаемых материалов, содержащих композиции из полиэтилена, крахмала и технологических добавок, в качестве которых используют гидроксипропилметилцеллюлозу и глицерин [9]. Сочетание биоразлагаемых компонентов в определенном соотношении с полимерами может обеспечивать высокую биодegradацию композиции, обладающую дополнительно высокими деформационно-прочностными характеристиками, термостабилизационными свойствами, высокой водостойкостью.

Цель представленной работы — разработка технологических приемов получения композиционных полимерных биоразлагаемых пленок с использованием специальных высокодисперсных материалов — отходов других производств, предварительно пропитанных сладкими растворами углеводов — сахара или патоки. В качестве дисперсных наполнителей предполагалось использовать два варианта различных по составу пористых компонентов, полученных из промышленных отходов: 1 — отходы теплоэнергетики (минеральные высоко дисперсные алюмосиликаты) — составная часть золы после сжигания каменного угля; 2 — отходы угледобывающей промышленности (окисленные угли). При этом одновременно преследовалась и другая важная техническая задача — повышение механической прочности готовой исходной биоразлагаемой полимерной композиционной продукции, необходимой для успеш-

ного использования в процессе ее эксплуатации.

Материалы и реактивы

Зола после сжигания каменного угля. Известно, что наибольшая часть энергетических ресурсов (около 70 %) приходится на тепловую энергию, образующуюся в настоящее время в процессе сжигания угольного топлива при температуре 1200–1700 °С. При этом одновременно образуются до 50 млн т в год золошлаковых отходов (ЗШО), накапливающихся в отвалах. Соотношение компонентов зола-шлак в этих отходах сжигания составляет 80 % золы и 20 % угольного шлака. ЗШО имеют сложный химический состав (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что основными компонентами ЗШО (суммарно более 70 %) являются оксиды SiO_2 и Al_2O_3 .

Часть этих отходов — легкая фракция (1–45 % общей массы ЗШО при сжигании бурых и каменных углей), известная

Таблица 1. Химический состав золошлаковых отходов

Table 1. The chemical composition of ash and slag waste

Компонент	Содержание, %	
	диапазон	среднее
SiO_2	51–60	54,5
TiO_2	0,5–0,9	0,75
Al_2O_3	16–22	19,4
Fe_2O_3	5–8	6,6
MnO	0,1–0,3	0,14
MgO	1,1–2,1	0,64
CaO	3,0–7,3	4,3
Na_2O	0,2–0,6	0,34
K_2O	0,7–2,2	1,56
SO_3	0,09–0,2	0,14
P_2O_5	0,1–0,4	0,24
Другие	5,8–18,8	10,6

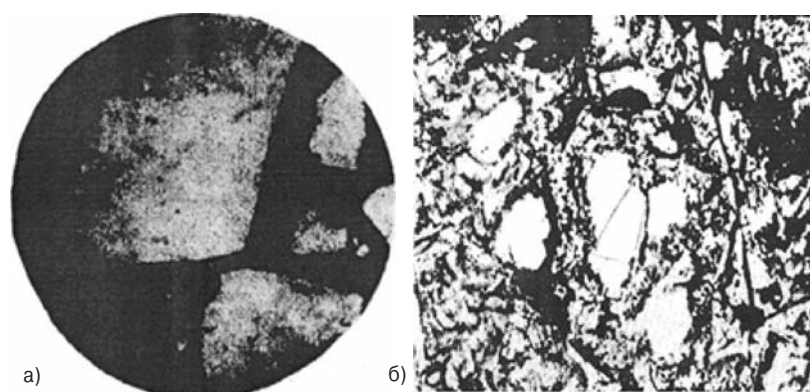


Рис. 2. Петрографическая структура угля:
а – неокисленный уголь; б – окисленный уголь

Fig. 2. Petrographic structure of coal:
a – non-oxidized coal; b – oxidized coal

как зола уноса, выносится при сжигании с дымовыми газами и отделяется от газа сухим (электрофилтры) или "мокрым" водным способами. Она имеет следующий состав, %: 50–60 SiO₂; 25–35 Al₂O₃; 1,5–2,5 Fe₂O₃; 0,1–1,5 CaO; 0,1–1,5 MgO; 0,2–2,9 K₂O; 0,3–1,5 Na₂O. Зола уноса представляет собой белый или серый легкий порошок, состоящий из сферических частиц размером 5–500 мкм с насыпной плотностью 0,32–0,37 г/см³, прочностью 10–50 МПа и низким коэффициентом теплопроводности — 0,06–0,1 Вт/(м·К). Температура ее плавления составляет 1300–1500 °С. В состав золы входят частицы различных минералов — глины (каолинит), гидрослюда, кварца, полевого шпата, монтмориллонита и др. [10]. Доля алюмосиликатных микросфер в золе уноса может составлять от 0,1 до 3 % и зависит от места

добычи угля, зольности и содержания минеральных примесей. Общий вид дисперсных компонентов золы уноса при разном увеличении представлен на рис. 1.

Представленные фотографии показывают, что зола имеет в своем составе разнородные по форме, размеру и цветности дисперсные частицы. Мелкие прозрачные сферические частицы, состоящие только из оксидов алюминия и кремния, образуются при наиболее высоких температурах. Более крупные полупрозрачные частицы золы имеют в своем составе некоторое количество оксидов металлов и образуют, например, железистые алюмосиликаты, входящие в угольное топливо. Темные частицы (до 10 % общей массы золы уноса) являются мелкими частицами недожога угля. Все они представляют из себя высокопористые продукты.

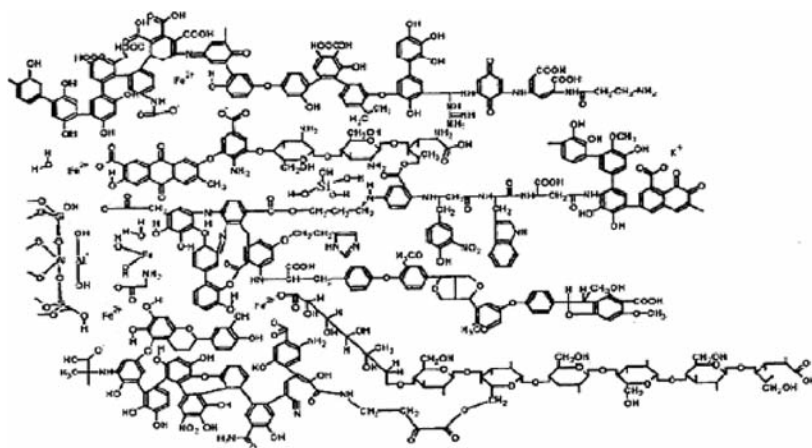


Рис. 3. Гипотетическая химическая формула гуминовых кислот
Fig. 3. Hypothetical chemical formula of humic acids

Окисленный уголь. Окисленный уголь — это уголь, изменивший свои физические и химические свойства при залегании в пластах или при хранении на поверхности в результате воздействия на него кислорода и влаги. В таком угле уменьшается содержание углерода, увеличивается содержание кислорода, снижается calorificity, а на поверхности одновременно появляются гуминовые вещества, в структуре материала возникают трещины и каверны. Для определения окисленности и выветренности углей применяют химические, физические и петрографические методы, описанные в ГОСТ 8930-79. Химический метод основан на определении увеличения карбоксильных и фенольных оксидов, на определении количества воды и оксидов углерода по сравнению с их содержанием в гуминовых кислотах. Физические методы основаны на определении теплоты сгорания и сравнении ее с эталонным образцом. Петрографический метод заключается в установлении степени выветренности, наличия трещин, каверн и пустот на поверхности исследуемого образца и основан на получении микрофотографий исследуемых образцов. Он является самым наглядным методом (рис. 2).

Из рис. 2 следует, что в образце окисленного угля наблюдается высокая степень выветренности угля и полная дезинтеграция угольных зерен с образованием каверн.

Такие угли теряют способность к спеканию, исчезает блеск, снижается их твердость и плотность. Поверхность угля, состоящая из сложного природного углеродсодержащего полимера, образует поверхностные окислы в виде кислородсодержащих комплексов углерода, карбоксильных, карбонильных групп, создавая гуминовые кислоты различной молекулярной массы [10], примерная структурная формула которых представлена на рис. 3.

Содержание активных гуминовых кислот в окисленном угле может варьироваться в пределах 1–70,2 %, их количество

зависит от месторождения, состава и марки угля. Известно, что их содержание (по Г.К. Панкратовой, В.И. Щелокову, Ю.Г. Сазонову, 2005 г.) в почве составляет до 1–5 % в верхнем (до 30 см) слое, в навозе до 5–15 %, в компостах, осадках сточных вод, сапропеле — 10–20 %, в торфе — 10–40 %.

Из рис. 3 следует, что окисленный уголь представляет сложный кислородсодержащий природный полимер, молекулярная масса, вид и содержание кислородсодержащих групп которого зависит от места добычи угля, времени и условий его окисления. Гуминовые кислоты нашли применение в сельском хозяйстве в качестве удобрений. Кроме того, эти вещества являются биологически активными материалами, способными увеличивать численность и скорость размножения почвенных микроорганизмов. При этом окисленный уголь в почве сам подвергается микробиологическому разрушению, т.е. потенциально может быть использован в качестве центров бактериального воздействия при утилизации предлагаемых композиционных биоразлагаемых пленок. Для усиления его биологической активности пористая окисленная угольная порода также дополнительно пропитывается сахаром.

Полимерная пленка. Для испытаний была выбрана полиэтиленовая пленка толщиной 150 мкм, изготовленная по ГОСТ 10354-82 из полиэтилена (ПЭ) высокого давления с молекулярной массой 500 тыс., с температурой плавления в диапазоне 103–115 °С, который чаще всего применяют для производства пакетов и упаковочных материалов [11].

Углеводный материал. В проводимых исследованиях использован сахарный продукт "Сахар белый кристаллический свекловичный" по ГОСТ 33222-2015.

Методика эксперимента

Эксперимент состоял из нескольких стадий: 1 — подготовка наполнителей (зольные компоненты, окисленный уголь); 2 — получение композиционных

Таблица 2. Свойства биоразлагаемых пленок
Table 2. Properties of biodegradable films

Образец*	Компоненты	Содержание, г/100 г пленки	Повышение прочности, %**	Потеря массы в почве, %
1	ПЭ гранулы	93,0	10	18
	Алюмосиликаты	5,3		
	Сахар	1,7		
2	ПЭ гранулы	93,1	15	20
	Окисленный уголь	5,2		
	Сахар	1,7		

*Образцы пленок 1 и 2 содержали алюмосиликаты и окисленный уголь соответственно.
**Относительное повышение прочности пленок определено на разрывной машине.

полимерных пленок, 3 — натурные испытания, 4 — обработка результатов и выводы.

Подготовка зольных компонентов. Выделение алюмосиликатных микросфер из ЗШО проведено методом флотации в водной среде за счет их всплывания на поверхность воды. Это является самым простым и экономичным способом отделения микросфер от золы. Выделенные микросферы высушивались в сушильном шкафу при температуре 130 ± 2 °С в течение 5 мин и отсеивался на ситах. Средний размер алюмосиликатных микросфер составлял 50 мкм. Далее проводилась пропитка алюмосиликатных микросфер 10 %-ным раствором сахарозы в течение 20 мин и сушка — на воздухе до воздушно-сухого состояния.

Подготовка окисленного угля. В работе использован окисленный уголь, добытый на Пермском разрезе Кемеровской области, имевший следующие показатели: рабочая влага — 23,9 %; зольность — 23 %; содержание летучих — 42,3 %; теплота сгорания (рабочая) — 3627 Ккал/кг.

Для использования в качестве наполнителя пленки проведено его измельчение до среднего размер частиц 50 мкм, пропитка 10 %-ным раствором сахарозы в течение 20 мин при перемешивании и сушка на воздухе до воздушно-сухого состояния.

Экспериментальный лабораторный образец композиционной пленки был получен из двух образцов стандартной полиэтиленовой пленки толщиной 150 мкм и площадью 1 дм² каждый по двухстадийной технологии: 1 стадия — равно-

мерное нанесение обработанного ранее сахарным сиропом дисперсного наполнителя на поверхность одного из образцов пленки и покрытие сверху другим ее образцом; 2 стадия — прокатывание дублированной полимерной системы нагретым валиком для склеивания за счет частичного расплавления полимера пленочных материалов. Микрофотография полученного образца пленки с алюмосиликатами представлена на рис. 4.

Из рис. 4 следует, что наполнитель относительно равномерно распределен в полимерном образце. Подобные микрофотографии получены также и для пленок с угольным наполнителем.

Натурные исследования были проведены в летнее время в течение 30 сут в среде с повышенным содержанием почвенных микроорганизмов и грибов на компостных грядках, в которых они способны взаимодействовать с полимерными пленками. Основными химически-

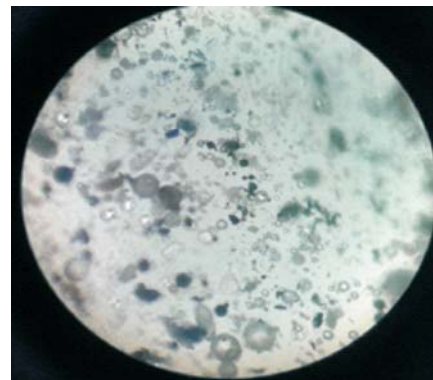


Рис. 4. Микрофотография опытного образца пленки с алюмосиликатами (x20)

Fig. 4. Micrograph of the prototype film with aluminosilicates (x20)

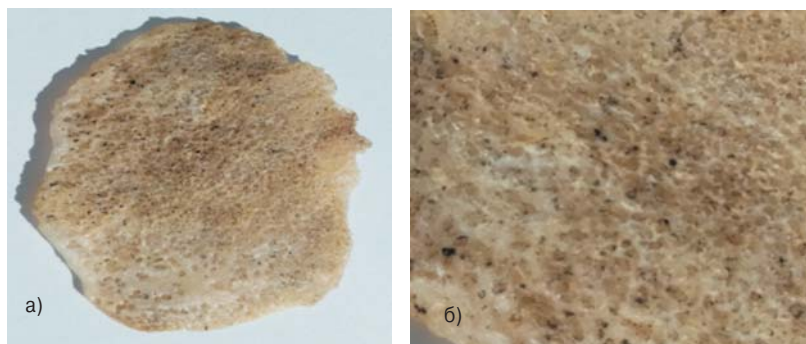


Рис. 5. Композиционная пленка с алюмосиликатами (а) и с окисленным углем (б) после натуральных испытаний

Fig. 5. Composite film with aluminosilicates (a) and with oxidized carbon (b) after field tests

ми продуктами метаболизма почвенных биологических субстанций, вызывающими повреждение синтетических полимерных материалов путем химической деструкции (гидролиз, окисление и пр.) макромолекул полимеров или низкомолекулярных компонентов (наполнители, пластификаторы и пр.), являются внеклеточные

ферменты и органические кислоты.

Наиболее полно изучено взаимодействие почвенных грибов с пленками. К микроорганизмам-деструкторам полимеров относятся следующие виды грибов: *Aspergillus wamori*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae*, *Trichoderma sp.*, *Aspergillus amstelodami*, *Aspergillus*

flavus, *Chaetomim globosum*, *Trichoderma lignorum*, *Cephalosporium aeremonium*, *Penicillium sp.*, *Rhizopus nigricans*, *Fusarium roseum* и др. Плесневые грибы вызывают химическое (метаболитами) и механическое (обрастание, прорастание мицелия в толщу материала) повреждение материалов [10]. Помимо чисто химической деструкции полимерных материалов микроорганизмы и метаболиты могут вызывать изменения их физико-химических и физических свойств в результате набухания, растрескивания.

Результаты основных экспериментов представлены в табл. 2 и на рис. 5.

Из табл. 2 следует, что при близких составах композиционных пленок наиболее прочными и биоразлагаемыми образцами являются полимерные материалы с использованием окисленного угля. При соблюдении температурного режима (20–25 °С) такие пленки могут разлагаться в почве в течение 5–6 месяцев.

Из рис. 5 следует, что поверхность пленок равномерно разрушена почвенными бактериями и грибами.

Промышленная технология

Для производства биodeградируемой полиэтиленовой пленки был выбран каландровый метод производства, основанный на формировании пленки путем непрерывного продавливания термопластичного материала через зазор между вальцами каландра. Данный метод позволяет производить пленки толщиной 0,08–1,0 мм. Для этого ПЭ гранулы, алюмосиликатные сферы или окисленный уголь, предварительно пропитанные сахарным раствором и просушенные до воздушно-сухого состояния, направляются в бункера, откуда гравиметрическим дозатором отбирается и взвешивается каждый ингредиент. Взвешенные компоненты поступают в смеситель, где проходят две стадии смешения: холодного смешения при температуре 40–60 °С и горячего смешения при 70–90 °С в течение 5 мин на каждой стадии. После перемешивания компоненты посту-

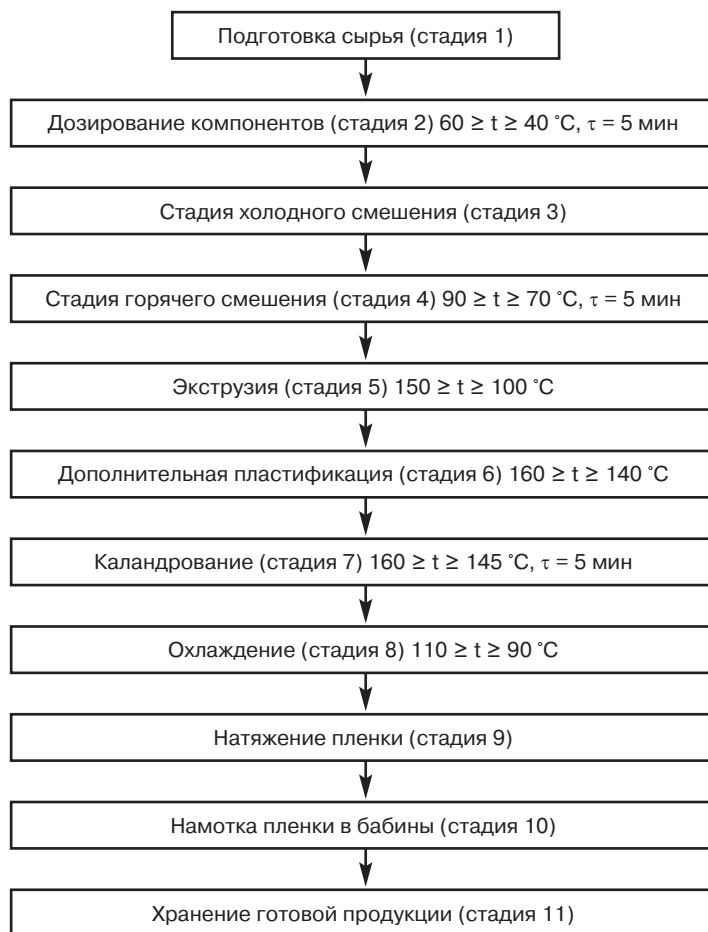


Рис. 6. Принципиальная схема производства биоразлагаемых полиэтиленовых пленок с использованием алюмосиликатных полых микросфер

Fig. 6. The principle scheme for the production of biodegradable polyethylene films using aluminosilicate hollow microspheres

пают в экструдер для пластификации полимерной массы при температуре $(100-150)\pm 2$ °С. Расплавленная масса поступает на вальцы каландра, где происходит основное формирование пленки. Далее пленка проходит через охлаждающие вальцы и попадает последовательно на тянущее и намоточное устройство.

Принципиальная технологическая схема, состоящая из 11 стадий, представлена на рис. 6. Конкретное оборудование и его параметры определяются проектными разработками.

Для успешной утилизации использованной пленки не-

обходимо создавать специальные биополигоны, на территории которых должны находиться компостные массы. Возможно совмещение территории складирования отходов животноводческих ферм с подобной площадкой утилизации.

Заключение

Представлены результаты исследований по созданию биоразлагаемых полимерных композиционных материалов с использованием высокодисперсных пористых материалов различной химической природы.

Предложены в качестве наполнителей пленок пористые алюмосиликатные микросферы — компоненты золы уноса, образующейся при сжигании угля, и пористый окисленный каменный уголь, пропитанные сахаром.

Натурные испытания полученных биоразлагаемых пленок доказали возможность их эффективной деградации при контакте с почвой, богатой почвенными бактериями.

Предложен вариант промышленной технологии производства биоразлагаемых пленок с используемыми наполнителями.

Литература

1. **Распоряжение** Правительства Российской Федерации от 21 июня 2014 г. № 1099 р. г. Москва (<http://www.pravo.ru>), 27.06.2014.
2. **Патент РФ № 2174132** Биологически разрушаемая термопластичная композиция. Пешехонова А.Л.; Любешкина Е.Г.; Сдобникова О.А., опубл. 27.09.2001.
3. **Бахаев А.Н., Ивановский С.К.** Обзор оксо-биоразлагаемых добавок используемых для утилизации упаковочных материалов. Молодой ученый. 2015. № 10. С. 156–158.
4. **Патент РФ № 2537009** Биологически разрушаемая термопластичная композиция на основе диасетата целлюлозы. Сдобникова О.А. опубл. 27.12.2014.
5. **Патент РФ № 2570905** Способ получения биodeградируемой термопластичной композиции. Дышлюк Л.С. опубл. 20.12.2015.
6. **Надыкта В.Д.** Биоразрушаемая упаковка для пищевых продуктов. Научные труды КубГТУ. 2017. № 5. С. 80–92.
7. **Касьянов Г.И.** Биоразрушаемая упаковка для пищевых продуктов. Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2015. Т. 1. № 1. 7 с.
8. **Шевченко Т.В., Новикова Я.А., Санников Ю.Н.** Рекультивация земель с использованием окисленных углей. Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (часть 23). С. 5100–5103.
9. **Исхаков Х.А.** Гуминовые комплексы. Вестник КузГТУ. 2010. № 6. С. 126–129.
10. **Римкевич В.С., Пушкин А.А., Чурушова О.В.** Комплексная переработка угольной золы ТЭЦ. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 250–259.
11. **Власов С.А., Ольхов А.А., Иорданский А.В.** О саморазлагающейся полимерной упаковке. Тара и упаковка. 2008. № 2. С. 42–47.

References

1. **Rasporyazhenie** Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21 iyunya 2014 g. № 1099 r. g. Moskva (<http://www.pravo.ru>), 27.06.2014.
2. **Patent RF № 2174132** Biologicheski razrushaemaya termoplastichnaya kompozitsiya. Peshekhonova A.L.; Lyubeshkina E.G.; Sdobnikova O.A., opubl. 27.09.2001.
3. **Bakhaev A.N., Ivanovskii S.K.** Obzor okso-biorazlagaemykh dobavok ispol'zuemykh dlya utilizatsii upakovochnykh materialov. Molodoi uchenyi. 2015. № 10. S. 156–158.
4. **Patent RF № 2537009** Biologicheski razrushaemaya termoplastichnaya kompozitsiya na osnove diasetata tsellyulozy. Sdobnikova O.A. opubl. 27.12.2014.
5. **Patent RF № 2570905** Sposob polucheniya biodegradiruemoi termoplastichnoi kompozitsii. Dyshlyuk L.S. opubl. 20.12.2015.
6. **Nadykta V.D.** Biorazrushaemaya upakovka dlya pishchevykh produktov. Nauchnye trudy KubGTU. 2017. № 5. S. 80–92.
7. **Kas'yanov G.I.** Biorazrushaemaya upakovka dlya pishchevykh produktov. Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii. 2015. T. 1. № 1. 7 s.
8. **Shevchenko T.V., Novikova Ya.A., Sannikov Yu.N.** Rekul'tivatsiya zemel' s ispol'zovaniem okislennykh uglei. Fundamental'nye issledovaniya. 2015. № 2 (chast' 23). S. 5100–5103.
9. **Iskhakov Kh.A.** Guminovye komplekсы. Vestnik KuzGTU. 2010. № 6. S. 126–129.
10. **Rimkevich V.S., Pushkin A.A., Churushova O.V.** Kompleksnaya pererabotka ugol'noi zoly TETs. Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2015. № 6. S. 250–259.
11. **Vlasov S.A., Ol'khov A.A., Iordanskii A.V.** O samorazlagayushcheisya polimernoii upakovke. Tara i upakovka. 2008. № 2. S. 42–47.

T.V. Шевченко – д-р техн. наук, профессор, Кемеровский государственный университет, 650000 Россия, г. Кемерово, ул. Красная 6, e-mail: yul48888048@yandex.ru • Ю.В. Устинова – канд. техн. наук, доцент, e-mail: yul48888048@yandex.ru • А.М. Попов – д-р техн. наук, профессор, e-mail: yul48888048@yandex.ru • Е.Д. Мельникова – магистр, e-mail: yul48888048@yandex.ru

T.V. Shevchenko – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kemerovo State University, 650000 Russia, Kemerovo, Krasnaya Str. 6, e-mail: yul48888048@yandex.ru • Yu.V. Ustinova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, e-mail: yul48888048@yandex.ru • A.M. Popov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: yul48888048@yandex.ru • E.D. Mel'nikova – Graduate Student, e-mail: yul48888048@yandex.ru