

## Применение топливных зол и отходов растениеводства в качестве вспомогательных добавок при производстве керамзитового гравия

Ю.Н. Картушина<sup>1</sup>, Н.В. Грачева<sup>1</sup>, В.Н. Храмова<sup>1</sup>, А.А. Короткова<sup>1</sup>,  
А.А. Амосова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Самарский государственный технический университет

**Аннотация:** В работе представлены результаты исследований влияния отходов топливных зол и соломы зерновых культур на свойства получаемого керамзитового гравия. Указанные отходы применялись в качестве вспомогательных добавок в сырьевую смесь. Лабораторным путем установлен оптимальный состав сырьевой смеси, для чего были проанализированы физико-механические характеристики опытных образцов, в том числе водопоглощение, прочность на сдвливание, насыпная плотность. Проведено сравнение характеристик образцов керамзитового гравия с требованиями государственных стандартов. Было выявлено, что добавление 5% топливных зол и 1,5% отходов растениеводства (соломы зерновых культур) обеспечивает оптимальное вспучивание смеси и высокие прочностные характеристики готового продукта.

**Ключевые слова:** керамзит, топливные золы, отходы растениеводства, вспучивание, строительные материалы, пористость.

**Введение.** В настоящее время существует острая потребность замены природного сырья на вторичные материальные ресурсы, образующиеся в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Данный аспект обусловлен уменьшением запасов полезных ископаемых, значительным воздействием на экосистемы при их добыче и переработке, а также образованием огромного количества отходов производства и потребления.

Одним из крупнотоннажных отходов в Российской Федерации являются топливные золы. Это обусловлено значительными объемами использования твердого топлива (уголь, торф, сланец). В результате ежегодно образуется около 50 млн. тонн отвалов вышеуказанных отходов, при уровне их утилизации всего лишь 10 % [1]. Организация и содержание отвалов сопряжена с выведением из области землепользования значительных площадей, около 20 тыс. км<sup>2</sup> земельных участков, на которых хранится 1,3-1,5 млрд. тонн топливных зол [2]. Данные техногенные образования вызывают различные негативные изменения в компонентах окружающей

---

среды. В них могут проникать токсичные соединения содержащие ртуть, мышьяк, селен, свинец, кадмий, цинк и другие подобные вещества. Попадание указанных элементов в воду и почву приводит к их накоплению в сельскохозяйственных растениях, живых организмах [3]. В связи с этим поиск новых направлений утилизации топливных зол является экологически и экономически обоснованным.

**Теоретическое обоснование.** Среди существующих направлений утилизации топливных зол можно выделить: дорожное строительство, рекультивацию земель, использование в качестве изолирующего материала на полигонах коммунальных отходов. Однако указанные способы не обеспечивают переработку данных отходов в достаточно большом объеме [1].

К перспективным направлениям по переработке топливных зол относится их применение для производства пористых строительных материалов, в частности керамзита. Это связано с возросшей за последние годы потребностью в качественных и недорогих мелкоштучных пористых материалах, и одновременно необходимостью расширения сырьевой базы для их производства [4]. Сырьем, используемым для производства легких заполнителей, являются природные минералы, такие, как глины и сланцы, к которым добавляются известные побочные продукты, например, летучая зола, доменный шлак [5].

Включение топливной золы в сырьевую смесь при изготовлении керамзита целесообразно. В состав данного отхода входят кристаллические и аморфные компоненты, а так же несгоревший углерод [6]. При этом не имеет значение тип угля, используемого для сжигания и условия его сгорания, химический состав летучей золы остается неизменным [7]. Меняя соотношение между основным сырьем (глиной) и топливной золой, регулируют следующие показатели: интервал плавкости (вспучиваемости),

---

вязкость расплава, степень кристаллизации черепка гранул, вспучиваемость глинистого сырья и, в результате, прочностные свойства готового изделия. Исследователями установлено, что прочность гранул повышается, если используемая зола содержит глинозем в интервале 20 - 35 %, оптимальное вспучивание гранул керамзита происходит при содержании оксида железа от 12 - 20%; содержание оксида кальция не должно превышать 7 - 12 %, остатков несгоревшего топлива не более 10% [8].

С применением топливной золы улучшается качество получаемой продукции, снижается расход технологического топлива, улучшаются формовочные и сушильные свойства масс, повышается прочность обожженного материала и снижается расход условного топлива при обжиге [9]. Добавление данного отхода в сырьевую смесь керамзита дает возможность уменьшить температуру начала контактного спекания на 100-200°С. Основная масса топливной золы быстро плавится и превращается в вязкий алюмосиликатный расплав. В результате в керамзите увеличивается количество и размер пор, они приобретают более правильную форму – формируется оптимальная микроструктура готового продукта [10].

Но в то же время добавление в сырьевую смесь топливной золы недостаточно, так как содержание органики в ней не высоко, поэтому необходима добавка компонента с высоким содержанием органической составляющей, например растительного происхождения. Одним из вариантов, и перспективных направлений, будет являться добавление в исходную смесь для производства керамзита отходов растениеводства, а именно соломы зерновых культур.

Органика хорошо выгорает, что позволит проводить процесс производства керамзита при меньших температурах, соответственно уменьшатся энергозатраты. Образующиеся на её месте поры снижают вес и придают дополнительно теплоизоляционные свойства готовому продукту. С

---

точки зрения безопасности такой керамзит более экологически чистый, и солома является легко доступным и постоянно образующимся компонентом. После уборки урожая большая часть этого отхода, как правило, остается неиспользованной, следовательно, может быть применена в качестве добавок и дешевых альтернатив в производстве строительных материалов [11].

ГОСТ 32026-2012 «Сырье глинистое для производства керамзитовых гравия, щебня и песка. Технические условия» определяет, что содержание органики в сырье для керамзита должно быть не более 3 %. При увеличении данного параметра керамзит становится крупнопористым, что ухудшает качество продукции [12].

Отход растениеводства (солома зерновых культур) состоит из 35 - 45% клетчатки и других углеводов, 2 - 6% протеина, 1,2 - 2% жира, 4 - 7% золы. Состав глинистого сырья, в пересчете на сухую массу, % (масс.):  $\text{SiO}_2$  – 40;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 25;  $\text{TiO}_2$  - 2,0;  $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  - 12,0;  $\text{CaO}$  - 6,0;  $\text{MgO}$  - 4,0;  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  - 6,0; органические вещества - 3,0.

Соотношения главных оксидов в топливной золе в среднем таковы:  $\text{SiO}_2$  – 40 - 58%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 21-27%;  $\text{CaO}$  – 4-6%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4-17%;  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,4-1,4%;  $\text{K}_2\text{O}$  – 0,4 - 4,7% [5].

**Экспериментальные исследования.** Целью эксперимента являлось определение оптимального соотношения всех используемых компонентов сырьевой смеси для производства керамзита, с условием соответствия его прочностных характеристик требованиям ГОСТ. Состав смеси был определен следующим образом: глинистое сырье и органоминеральная добавка (топливные золы, солома зерновых культур), в соотношениях, приведенных в таблице 1.

Процесс изготовления опытных образцов керамзитового гравия включал в себя следующие этапы: вначале было приготовлено глинистое

тесто с добавлением отходов топливных зол и соломы зерновых, его формовочная влажность составляла около 30%.

Таблица № 1

Соотношение компонентов сырьевой смеси 1 и 2

Глинистое сырье, %		Солома зерновых культур, %		Топливные золы, %		% общей органики в образце	
1	2	1	2	1	2	1	2
94,5	93,5	2,5	1,5	3	5	3,64	2,86
93	92,5	4	1,5	3	6	3,89	2,87
94,5	91,5	1,5	1,5	4	7	4,69	2,88
93,5	91	2	1,5	4,5	7,5	5,02	2,9
92,5	90,5	2,5	1,5	5	8	5,35	2,92

Полученная смесь выдерживалась 2-3 часа, затем формировались гранулы керамзита диаметром 18 мм, массой 10 г. Гранулы предварительно высушивались 1,5 часа при температуре 100 - 110°C в сушильном шкафу. Затем их в течение 10 мин, при температуре 1050 - 1075°C, подвергали обжигу в электрической муфельной печи. На следующем этапе обожженные вспученные гранулы поместили в сушильный шкаф при температуре 300°C на 20 минут и охладили при комнатной температуре. В результате получили керамзитовый гравий, с тонкой поверхностной коркой коричневого цвета.

Образцы керамзита исследовались на физико-механические свойства, указанные в таблице 2, в соответствии с требованиями ГОСТ 9758 – 2012 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Было выявлено, что солома зерновых при выгорании обеспечивает хорошую вспучиваемость, т. е. внутри материала образуются поры, в которых восстановительная среда обеспечивается за счет присутствия органических примесей или добавок [13].

На рисунках 1 и 2 показаны результаты определения зависимости коэффициента вспучивания от содержания органики в смесях 1 и 2.

Таблица 2

Физико-механические свойства образцов керамзита

Смесь 1							
общая органика, %	Диаметр, см	Объем сферы, см <sup>3</sup>	Коэф. вспучивания	Масса после обжига, г	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %
3,64	2,08	4,7	2,63	7,92	1685	442	28
3,89	2,1	4,84	2,64	7,808	1612	365	25
4,69	2,16	5,27	2,68	7,388	1430	360	16,3
5,02	2,2	5,57	2,7	7,104	1326,3	354	14,4
5,35	2,56	5,78	2,8	7,06	740	342,5	13,6
Смесь 2							
общая органика, %	Диаметр, см	Объем сферы, см <sup>3</sup>	Коэф. вспучивания	Масса после обжига, г	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %
2,86	2,1	4,84	2,51	11,07	2287	421	16,4
2,87	2,1	4,84	2,53	10,8	2024	365,2	14,4
2,88	2,2	5,57	2,53	10,3	1849	359,2	13,8
2,9	2,3	6,36	2,58	10,3	1619	351,8	11,4
2,92	2,35	6	2,6	9,5	1705	345,2	10

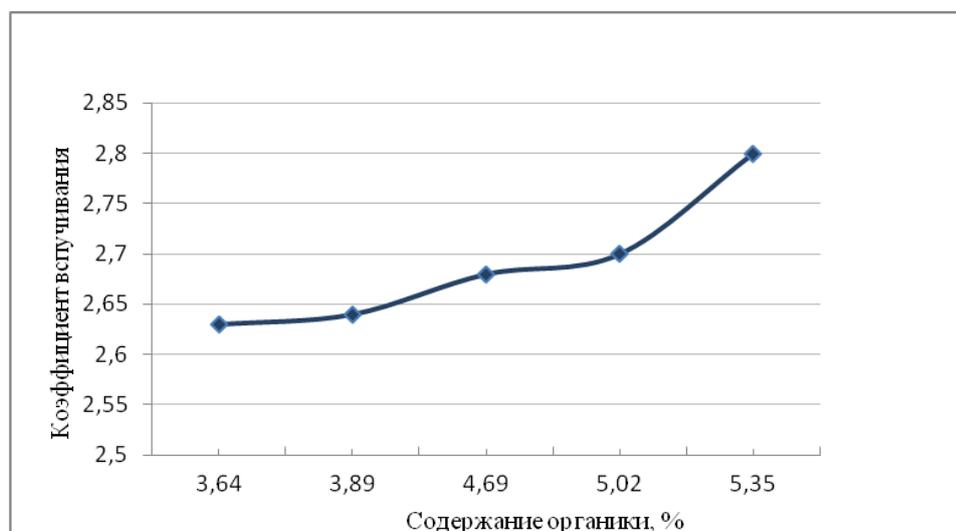


Рис. 1. - Зависимость коэффициента вспучивания от содержания органики, смесь 1



Рис. 2. - Зависимость коэффициента вспучивания от содержания органики, смесь 2

Из графиков на рисунках 1 и 2 можно сделать выводы, что хорошую вспучиваемость показали практически все образцы керамзита. Но, так как в каждом образце содержание органики отличается, его характеристики могут значительно варьироваться и не соответствовать требованиям ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия».

Высокое содержание органики может привести к избыточному порообразованию, что не благоприятно влияет на конечные характеристики керамзитового гравия. Увеличение содержания топливной золы в смеси (как минеральной составляющей смеси керамзита) до 8 % (сырьевая смесь 2) к соломе зерновых культур снижает содержание общей органики до 2,9%, что по требованиям ГОСТ 32026 – 2012 является оптимальным. Кроме того, при увеличении золы как минеральной добавки снизилось водопоглощение образцов, что так же является положительной характеристикой для керамзитового гравия. Снижение водопоглощения связано с тонкими минеральными частицами, а также наличием в составе золы свободного или гидратного СаО и сульфатов кальция [2].

Важной характеристикой керамзита, как товарного продукта, является насыпная плотность. На рисунках 3, 4 приведены результаты исследования образцов полученного керамзитового гравия на зависимость коэффициента вспучивания от насыпной плотности. График показывает: чем выше коэффициент вспучивания сырья, тем меньше насыпная плотность керамзита.

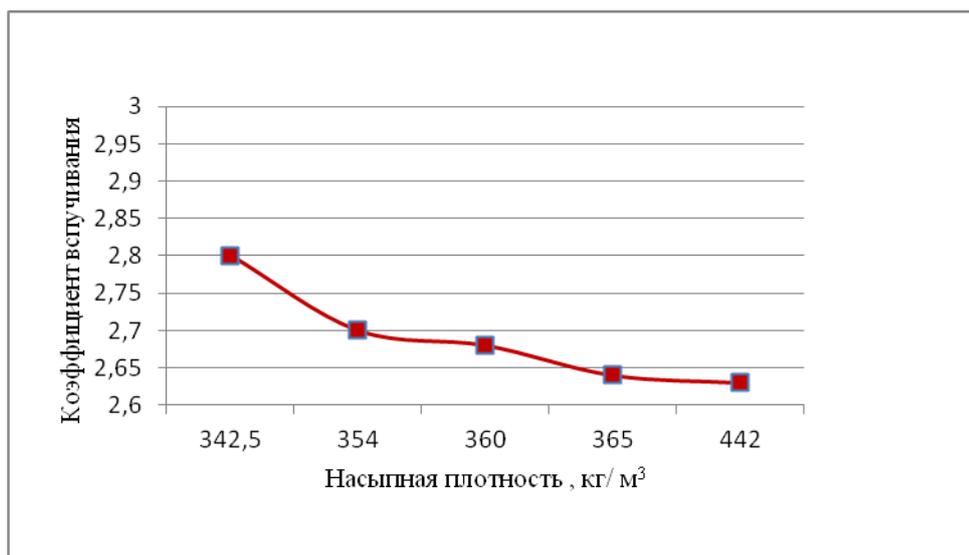


Рис. 3. - Зависимость коэффициента вспучивания от насыпной плотности, смесь 1

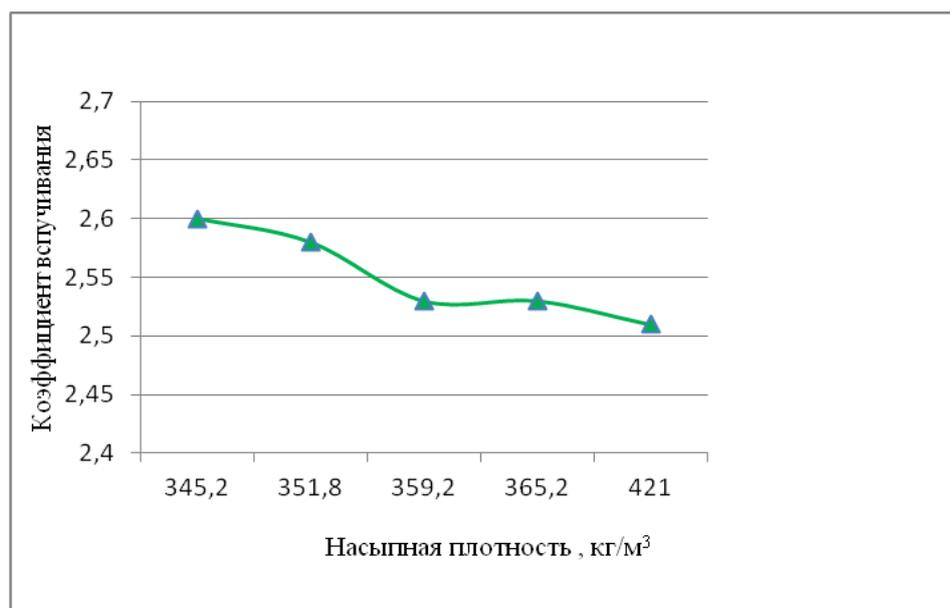


Рис. 4. - Зависимость коэффициента вспучивания от насыпной плотности, смесь 2

Исходя из приведенных выше исследований, наиболее соответствует требованиям ГОСТ 32026 – 2012 сырьевая смесь 2, поэтому для образцов, изготовленных из этой смеси, в гидравлическом прессе были проведены испытания на прочность, результаты показаны в Таблице 3.

Таблица 3

Показатели прочности образцов керамзита в зависимости от содержания органики и коэффициента вспучивания (смесь 2)

Содержание органики, %	Прочность при сдавливании, МПа	Коэффициент вспучивания
2,86	1,51	2,51
2,87	1,37	2,53
2,88	1,31	2,53
2,9	1,18	2,58
2,92	1,06	2,6

Как видно из данных представленных в Таблице 3 наиболее оптимальный показатель прочности - 1,51 МПа достигнут при содержании общей органики в смеси, равном 2,86 %. В этом образце количество золы составляет 5% от общей смеси, при дальнейшем её увеличении начинает снижаться прочность керамзита. Соответственно общее содержание органики 2,86%, даёт хорошую вспучиваемость образцов ( $k > 2,5$ ), насыпную плотность 421 кг/м<sup>3</sup>, плотность керамзита 2287 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощение 16,4% (Таблица 2). Все эти показатели соответствуют требованиям ГОСТ 32496-2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия», в соответствии с которыми полученный керамзитовый гравий можно отнести по насыпной плотности к марке М450, по прочности к марке П75.

### Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что добавление в сырьевую смесь для изготовления керамзитового гравия топливных зол и соломы зерновых культур позволяет достичь

наилучшего вспучивания сырьевой смеси ( $k > 2,5$ ) и соответствия свойств готового продукта требованиям ГОСТ 32496-2013.

Был определен состав сырьевой смеси с процентным соотношением компонентов, который представлен в Таблице 4.

Таблица № 4

Состав сырьевой смеси с оптимальным содержанием топливных зол и соломы зерновых культур

Компонент	Содержание, %
Глинистое сырье	93,5
Топливная зола	5
Солома зерновых культур	1,5

При этом содержание общей органики составляет 2,86%, что соответствует требованиям к глинистому сырью для производства керамзитового гравия. Указанное соотношение компонентов позволяет получить готовый продукт с оптимальными свойствами: прочность - 1,51 МПа, насыпная плотность 421 кг/м<sup>3</sup>, плотность 2287 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощение 16,4%.

### Литература

1. Полубояров В. А., Волоскова Е. В., Гончар Т. В., Коротаева З. А. Получение керамзита из техногенных отходов металлургии и теплоэлектростанции // Рециклинг вторичных ресурсов металлургической и электрометаллургической промышленности: технологический, экологический, и экономический аспекты. Материалы II международного конгресса 2-4 сентября 2010 года. Г. Красноярск, С. 758-761.
2. Abubakar, A. U. and Baharudin K. S. Potential use of malaysian thermal power plants coal bottom ash in construction. Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, 2012. V. 3, №2. pp. 1-13.

3. Крылов, Д. А. Негативное влияние элементов примесей от угольных ТЭС на окружающую среду и здоровье людей // Горный информационно - аналитический бюллетень (научно – технический журнал). 2017. №12. С. 77-87.
  4. Абдрахимова Е. С., Абдрахимов В. З. Использование отходов черной металлургии в производстве керамического кирпича // Научно-практический журнал экология производства. 2013. №3. С. 52-55.
  5. Gorman, P. Technical note - Lightweight aggregate in Western Europe. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1998. V.2. №4. pp. 211-219.
  6. Adegbola, A. A. and Dada M. J. Development of mathematical equations and programs for the optimization of concrete mix designs. Journal of Science & Technology. 2012. V. 5 №11. pp. 1-18.
  7. Okonta, F. N. Frictional resistance of coal dust fouled uniformly graded aggregates. International Journal of the Physical Sciences. 2012. V. 7. №23. pp. 2960–2970.
  8. Баранов, Е. А., Грехов П. И. Исследование влияния отходов техногенного происхождения на физико–механические характеристики керамзита // Молодежь, наука, технологии: новые идеи и перспективы: материалы III международной научной конференции. Томск 22-25 ноября 2016 г. ТГАСУ. С. 258-263.
  9. Явруян Х. С., Гайшун Е. С. Инновационные добавки при производстве стеновой керамики // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3763](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3763).
  10. Старостина И. В., Симонов М. М., Пендюрин Е. А., Беседина И. Н. Оценка токсикологических свойств керамзитового гравия с использованием шламов феррованадиевого производства // Журнал
-

современные проблемы науки и образования. 2014. №5. URL: science-education.ru/ru/article/view?id=14533.

11. Li, Z., Wang L. and Wang X. Flexural characteristics of coir fiber reinforced cementitious composites. *Fibers Polym.* V. 7. 2006. Date Views 01.09.2021 URL: doi.org/10.1007/BF02875686.

12. Соцкая И. М. Использование отходов промышленного производства для получения легких бетонов // Вестник АПК Верхневолжья. 2010. №9. С. 59-61.

13. Бабак Н. А., Масленникова Л. Л., Славин А. М. Использование промышленных отходов при производстве жаростойких бетонов // Журнал экологии урбанизированных территорий. 2009. №1. С. 72-75.

### References

1. Poluboyarov V. A., Voloskova E. V., Gonchar T. V., Korotayeva Z. A. *Materialy II mezhdunarodnogo kongressa 2-4 sentyabrya 2010, Krasnoyarsk*, pp. 758-761.

2. Abubakar, A. U. and K. S. Baharudin. *Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, 2012. V. 3, №2. pp. 1-13.

3. Krylov, D. A. *Gornyy informatsionno - analiticheskiy byulleten' (nauchno – tekhnicheskiy zhurnal)*. 2017. №12. pp. 77-87.

4. Abdrakhimova E. S., Abdrakhimov V. Z. *Nauchno-prakticheskiy zhurnal ekologiya proizvodstva*. 2013. №3. pp. 52-55.

5. Gorman, P. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 1998. V.2. №4. pp. 211-219.

6. Adegbola, A. A. and M. J. Dada. *Journal of Science & Technology*. 2012. V. 5 №11. pp. 1-18.

7. Okonta, F. N. *International Journal of the Physical Sciences*. 2012. V. 7. №23. pp. 2960–2970.



8. Baranov, E. A., Grekhov P. I. Molodezh', nauka, tekhnologii: novyye idei i perspektivy: materialy III mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Tomsk 22-25 noyabrya 2016 g. TGASU. pp. 258-263.
9. Yavruyan X. S., Gayshun E. S. Inzhenernyj vestnik Dona. 2016. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3763](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3763).
10. Starostina I. V., Simonov M. M., Pendyurin E. A., Besedina I. N. Zhurnal sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. №5. URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=14533](http://science-education.ru/ru/article/view?id=14533).
11. Li, Z., L. Wang and X. Wang. Fibers Polym. 2006. V. 7. Date Views 01.09.2021 URL: [doi.org/10.1007/BF02875686](https://doi.org/10.1007/BF02875686).
12. Sotskaya I.M. Vestnik APK Verkhnevolzh'ya. 2010. №9. pp. 59-61.
13. Babak N. A., Maslennikova L. L., Slavin A. M. Zhurnal ekologii urbanizirovannykh territoriy. 2009. №1. pp. 72-75.