

УДК 66.092-977:62-663

**ПЕРЕРАБОТКА ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА В УГОЛЬНЫЕ БРИКЕТЫ
ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ**

Тунцев Д.В., Харьков В.В., Кузнецов М.Г.

Реферат. Актуальной проблемой современного агропромышленного комплекса является низкая эффективность использования вторичных сырьевых ресурсов. На основании данных Росстата, в стране в 2018 г. было собрано почти 13 млн т семян подсолнечника, что привело к накоплению до 1,8–3,2 млн т лузги, которая является балластной составляющей технологии получения подсолнечного масла. Маслоперерабатывающие предприятия непрерывно несут затраты по хранению, обеспечению безопасности, а также вывозу и размещению таких отходов на свалках. Лузга подсолнечника обладает высокой теплотворной способностью, поэтому термохимические методы переработки позволяют обеспечить комплексную переработку невостребованного сырья растительного происхождения с умеренными капитальными затратами в энергию и различные химические продукты. Разработана экспериментальная лабораторная установка кондуктивного пиролиза растительного сырья для получения угольных брикетов высокой прочности. Преимуществами пиролизных реакторов с кондуктивным подводом тепла являются простота конструкции и легкость в обслуживании. Результаты опытного исследования процесса кондуктивного пиролиза лузги подсолнечника показали, что полученные угольные брикеты имеют низкую зольность (6,2 %), их максимальный выход (29 %) достигнут при давлении прессования 25 кг/см^2 , а максимальное значение плотности образцов – 1139 кг/см^3 (давление прессования 153 кг/см^2). Найдено, что увеличение давления прессования от 20 до 150 кг/см^2 приводит к повышению плотности угольных брикетов на 16 %, а максимальное значение давления на сжатие составляет 566 кг/см^2 . Также при давлении прессования свыше 50 кг/см^2 показатель сопротивления удару при сбрасывании достигает 100 %. Разработанная технология обеспечивает большой массовый выход угольных брикетов с высокими качественными характеристиками, что свидетельствует о перспективности утилизации лузги подсолнечника методом кондуктивного пиролиза в топливное сырье для металлургической промышленности.

Ключевые слова: кондуктивный пиролиз, лузга подсолнечника, угольные брикеты высокой прочности, растительные отходы, альтернативные источники энергии.

Введение. В последнее десятилетие в России наметились современные тенденции по обеспечению стабильности развития на основе бережного расходования имеющихся ресурсов, рационального природопользования, экологической безопасности производств и т. д. Наиболее активно обсуждаются актуальные проблемы обеспечения целесообразного расходования природных запасов, энергосбережения и открытия новых источников энергии [1–2]. Растительная биомасса представляет собой перспективный, экологически безопасный и альтернативный источник возобновляемой энергии [3].

Существенной проблемой сельскохозяйственного комплекса является низкая эффективность использования вторичных сырьевых ресурсов. Так при производстве подсолнечного масла происходит обрушивание масличных семян для разрушения оболочки (лузги) с целью последующего ее отделения от ядра. Лузга содержит вещества (клетчатка, воски и т. д.), наличие которых в шроте и масле крайне нежелательно. По данным Росстата, в РФ в 2018 г. было собрано почти 13 млн т семян подсолнечника, что привело к накоплению до 1,8–3,2 млн т лузги. Маслоперерабатывающие предприятия несут постоянные затраты по

хранению, обеспечению безопасности, а также вывозу и размещению этого вида отходов на свалках. Они также обязаны регулярно осуществлять платежи за негативное воздействие на окружающую природную среду (экологические платежи) за отсутствие технологии утилизации и использования собственных отходов.

В настоящее время существует множество промышленных направлений переработки лузги подсолнечника [4–5], которые, однако, не позволяют полностью переработать этот ценный ресурс растительного происхождения в экономически выгодные продукты, что приводит к его накоплению. Известно [6–7], что лузга подсолнечника обладает высокой теплотворной способностью, что в совокупности с дешевизной и доступностью делает ее перспективным и конкурентоспособным видом топлива.

Термохимические методы переработки сельскохозяйственных отходов позволяют обеспечить комплексную переработку невостребованного растительного сырья с умеренными капитальными затратами в энергию и различные химические продукты [8–9]. Современные технологии пиролиза растительной биомассы могут быть классифицированы по

следующим признакам:

скорость нагрева (быстрый, медленный пиролиз);

среда, в которой происходит пиролиз (вакуумный, гидропиролиз, метанопиролиз);

в зависимости от способа нагрева системы (прямой, косвенный).

Теплопередача может осуществляться газовыми и твердыми теплоносителями. В первом случае передача тепла частицам биомассы происходит посредством конвекции, во втором – кондуктивно. Одновременно с конвективной и кондуктивной теплопередачами также во всех типах реакторов происходит передача тепла излучением. Тем не менее, чтобы обеспечить эффективное преобразование биомассы в твердые, жидкие и газообразные продукты, в разных пиролизных реакторах используются различные методы теплопередачи. Преимуществами реакторов с кондуктивным подводом тепла для осуществления процесса пиролиза являются простота конструкции и легкость в обслуживании [10].

Авторы [11] провели исследование физико-химических свойств лузги подсолнечника и определили наилучшие параметры термохимической переработки при увеличении температуры процесса для достижения наибольшего выхода угля и пиролизной жидкости.

Целями данной работы являются экспериментальное исследование процесса кондуктивного пиролиза лузги подсолнечника и определение качественных характеристик полученных угольных брикетов.

Условия, материалы и методы исследований. С целью исследования процесса кондуктивного пиролиза лузги подсолнечника на кафедре переработки древесных материалов ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» была спроектирована и создана экспериментальная лабораторная установка кондуктивного пиролиза растительного сырья (рисунок 1). Основные технические характеристики экспериментальной установки кондуктивного пиролиза растительного сырья

Таблица 1 – Технические характеристики экспериментальной установки кондуктивного пиролиза растительного сырья

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочей температуры, °С	20...600
Максимальное усилие, т	10
Ход штока цилиндра, мм	180
Диаметр верхнего и нижнего цилиндров установки, мм	50
Габаритные размеры, мм	1060x540x500
Вес, кг	60

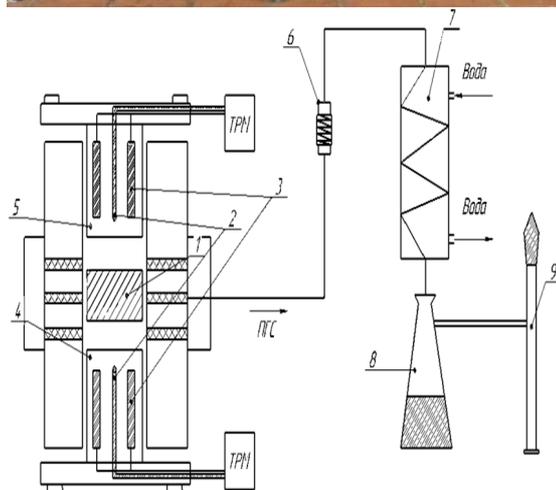


Рисунок 1 – Общий вид и схема экспериментальной установки для исследования

кондуктивного пиролиза растительного сырья:

1 – образец материала; 2 – термопары;

3 – электронагреватели; 4 – нижний цилиндр установки; 5 – верхний цилиндр установки;

6 – клапан; 7 – конденсатор;

8 – сборник жидкого продукта;

9 – факел

риментальной установки представлены в табл. 1.

В качестве основы конструкции установки был выбран гидравлический настольный пресс Т61210 (АЕ&Т, КНР). Она работает следующим образом: перерабатываемое растительное сырье массой 30 г помещается на нижний цилиндр установки и запрессовывается верхним. Давление прессования составляет 0,5, 1,0 и 3,0 т. Затем осуществляется нагревание материала до температуры 450 °С и выдержка продолжительностью 20 мин. Далее полученный образец охлаждается до 30–40 °С.

В качестве исходного сырья для переработки использовалась лузга подсолнечника, основные физические характеристики которой приведены в табл. 2.

В ходе проведенных исследований были получены образцы плоскоцилиндрической формы диаметром 50 мм (рисунок 2).

Таблица 2 – Физические свойства исходного материала

Наименование показателя	Значение
Длина частиц лузги, мм	4,2...7,3
Ширина частиц лузги, мм	1,6...3,0
Влажность, %	4,5...7,0
Насыпная плотность, кг/м ³	90
Теплота сгорания, кДж/кг	17200

Для определения качественных характеристик полученных угольных брикетов определяли их зольность и показатели механической прочности. Зольность брикетов определяли прокалкой в муфельной печи, разогретой до температуры 750±5 °С в соответствии с ГОСТ 33625-2015. Зольность пробы в %, рассчитывали по формуле:

$$Z = 100 \frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0}, \quad (1)$$

где m_1 – масса тигля с навеской, г; m_0 – масса пустого тигля, г; m_2 – масса тигля с прокаленным остатком, г.

Механическую прочность при сжатии полученных брикетов из лузги подсолнечника определяли в соответствии с ГОСТ 21289-75 на лабораторном гидравлическом прессе. Угольный брикет помещали между цилиндрическими вставками прессы так, чтобы вставки упирались в центры его параллельных поверхностей, ограниченных длиной и шириной брикета. Затем повышали давление и доводили брикет до разрушения. По максимальному значению давления, при котором наблюдалось разрушение брикета, рассчитывали механическую прочность брикетов при сжатии:

$$\sigma_{сж} = \frac{\bar{P}_{max} d^2}{d_1^2}, \quad (2)$$

где \bar{P}_{max} – среднее арифметическое значение максимального давления разрушающего брикеты, кг/см², вычисляемое по выражению:

$$\bar{P}_{max} = \sum P_{max} / n, \quad (3)$$

где $\sum P_{max}$ – сумма значений максимальных разрушающих брикеты давлений, кг/см²; n – количество испытанных брикетов; d – диаметр рабочего поршня прессы, мм; d_1 – диаметр торцевой поверхности цилиндрической вставки, мм.

Сопrotивление брикетов удару при сбрасывании определяли скидыванием их с высоты 1,5 м на стальную плиту толщиной 20 мм с последующей сортировкой на классы более/менее 5 мм и их взвешиванием на электронных весах VIBRA AJH-420CE (класс точности II; SHINKO DENSHI CO., LTD, Япония). В процентном соотношении сопротивление брикета удару при сбрасывании $P_{уд}$ определяли по следующей формуле:

$$P_{уд} = 100 \frac{m}{m+m_1}, \quad (4)$$

где m – масса класса свыше 5 мм после сбрасывания брикета, г; m_1 – масса класса менее 5 мм после сбрасывания брикета, г.

Анализ и обсуждение результатов исследования. Результаты исследований зольности угольных брикетов показали, что массовая доля золы в брикетах из лузги подсолнечника составила низкую величину в 6,2%. На рис. 3 и 4 представлены результаты исследований влияния величины давления прессования, в процессе кондуктивного пиролиза, на массовый выход твердого продукта и плотности получаемых образцов.

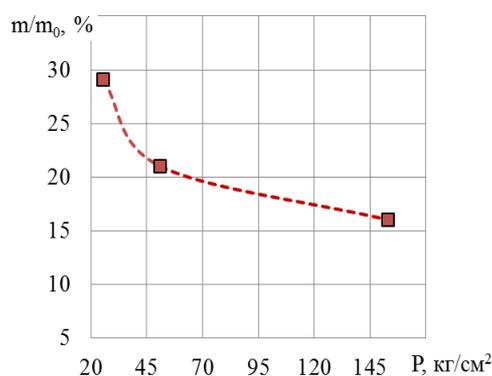


Рисунок 3 – Массовый выход угольных брикетов от давления прессования при кондуктивном пиролизе

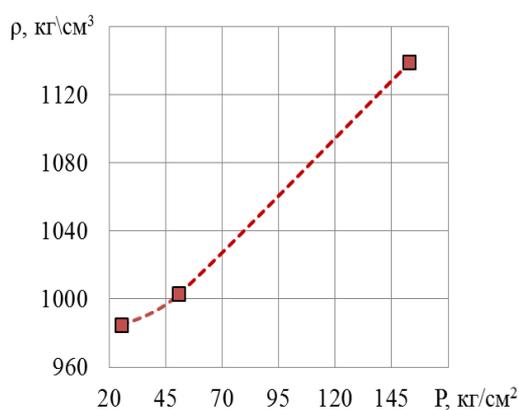


Рисунок 4 – Изменение плотности угольных брикетов в зависимости от давления прессования при кондуктивном пиролизе

Результаты исследований показали, что процесс кондуктивного пиролиза переработки лузги подсолнечника на разработанной лабораторной установке позволил достичь высокого значения выхода угля. Максимальное значение выхода угля 29% достигается при давлении прессования 25 кг/см². Однако увеличение давления прессования в процессе термического разложения ведет к снижению выхода твердого остатка. Данное явление объясняется тем, что увеличение давления прессования

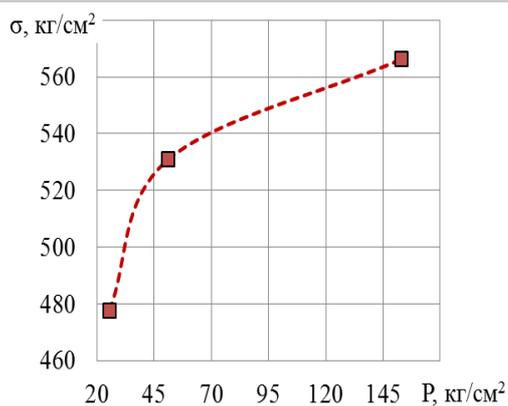


Рисунок 5 – Изменение прочности угольных брикетов при сжатии

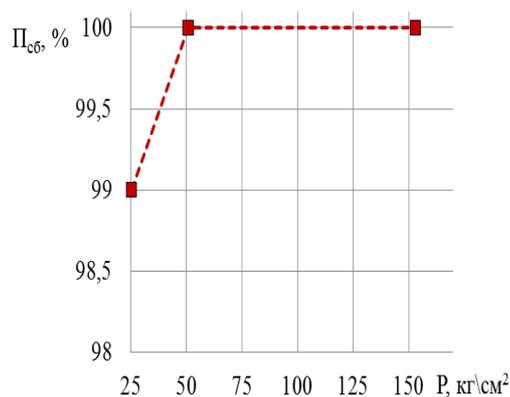


Рисунок 6 – Сопротивление угольных брикетов удару при сбрасывании

приводит к интенсификации процесса кондуктивного пиролиза, в связи с чем возрастает выход пиролизных газов и снижается выход твердого продукта. В то же время увеличение величины давления прессования позволяет повысить плотность получаемых угольных брикетов на 16 % в диапазоне давлений от 20 до 150 кг/см².

Результаты исследований механической прочности брикетов представлены в виде графических зависимостей на рисунках 5 и 6.

Согласно результатам исследований, полученный при кондуктивном пиролизе твердый продукт имеет высокие показатели сопротивления на сжатие. Максимальное значение, при котором произошло разрушение образца, составило 566 кг/см². Также графическая зависимость прочностных характеристик полученного материала показывают возможность увеличение показателей сопротивления образца на сжатии при увеличении давления прессования в процессе пиролиза.

Результаты исследований сопротивления угольных брикетов удару при сбрасывании

показали увеличение показателя в диапазоне от 20 до 50 кг/см², а при дальнейшем повышении давления он равен 100 %.

Выводы. По результатам экспериментального исследования процесса кондуктивного пиролиза лузги подсолнечника получены следующие выводы:

полученные угольные брикеты имеют низкую зольность (6,2 %);

максимальный выход твердого продукта (29 %) достигнут при давлении прессования 25 кг/см²;

максимальное значение плотности образцов – 1139 кг/см³ (давление прессования 153 кг/см²);

увеличение давления прессования от 20 до 150 кг/см² приводит к повышению плотности угольных брикетов на 16 %;

максимальное значение давления на сжатие, при котором произошло разрушение образца, составляет 566 кг/см²;

при давлении прессования свыше 50 кг/см² показатель сопротивления удару при сбрасывании достигает 100 %.

Литература

1. Nižetić S. Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management / S. Nižetić, N. Djilali, A. Papadopoulos, J.P.C. Rodrigues // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – Vol. 231. – № 10. – P. 565–591.
2. Martinho V.J.P.D. Interrelationships between renewable energy and agricultural economics: An overview / V.J.P.D. Martinho // *Energy Strategy Reviews*. – 2018. – Vol. 22. – № 10. – P. 396–409.
3. Herbert G.M.J. Quantifying environmental performance of biomass energy / G.M.J. Herbert, A.U. Krishnan // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 59. – P. 292–308.
4. Osman, N. S. Sunflower shell waste as an alternative animal feed / N. S. Osman [et al.] // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – № 10. – P. 21905–21910.
5. Кузнецов, М. Г. Математическое моделирование конической установки для мокрого измельчения / М. Г. Кузнецов, В. В. Харьков, Н. З. Дубкова // *Вестник технологического университета*. – 2016. – Т. 19. – № 20. – С. 164–166.
6. Zabaniotou A. A. Sunflower shells utilization for energetic purposes in an integrated approach of energy crops: Laboratory study pyrolysis and kinetics / A. A. Zabaniotou, E. K. Kantarelis, D. C. Theodoropoulos // *Bioresource Technology*. – 2008. – Vol. 99. – P. 3174–3181.
7. Харьков, В. В. Особенности моделирования процесса сухого фракционирования зернобобового сырья / В. В. Харьков, А. Н. Николаев // *Научно-технический вестник Поволжья*. – 2019. – № 9. – С. 7–14.
8. Грачев, А. Н. Технология быстрого пиролиза при энергетическом использовании низкокачественной древесины / А. Н. Грачев [и др.] // *Энергетика Татарстана*. – 2008. – № 4. – С. 16–20.
9. Bhaskar, T. Chapter 1 – Advances in Thermochemical Conversion of Biomass – Introduction / T. Bhaskar, A. Pandey // *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass* / eds. A. Pandey [et al.]. – Boston: Elsevier, 2015. – P. 3–30.

10. Tuntsev, D. V. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste / D. V. Tuntsev, R. G. Safin, R. G. Hismatov, R. A. Halitov, V. I. Petrov // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – С. 1–4.

11. Харьков, В. В. Термохимическая переработка лузги подсолнечника / В. В. Харьков, Д. В. Тунцев, М. Г. Кузнецов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2018. – Т. 13. – № 4. – С. 130–134.

Сведения об авторах:

Тунцев Денис Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры переработки древесных материалов, e-mail: tuncev_d@mail.ru.

Харьков Виталий Викторович – старший преподаватель кафедры оборудования пищевых производств, e-mail: v.v.kharkov@gmail.com

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Россия
Кузнецов Максим Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры экономики и информационных технологий, e-mail: max-genn@ya.ru

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», г. Казань, Россия.

PROCESSING SUNFLOWER HUSK INTO HIGH STRENGTH COAL BRIQUETTES

Tuntsev D.V., Kharkov V.V., Kuznetsov M.G.

Abstract. An urgent problem of the modern agro-industrial complex is the low efficiency of the use of secondary raw materials. On the basis of Rosstat data, in 2018 almost 13 million tons of sunflower seeds were collected in the country, which led to the accumulation of up to 1.8-3.2 million tons of husk, which is the ballast component of the technology for producing sunflower oil. Oil refineries continuously bear the costs of storage, safety, and the removal and disposal of such waste in landfills. Sunflower husk has a high calorific value, so thermochemical processing methods allow for the integrated processing of unclaimed raw materials of plant origin with moderate capital costs in energy and various chemical products. An experimental laboratory setup for conductive pyrolysis of plant materials has been developed to produce high-strength coal briquettes. The advantages of conductive heat feed pyrolysis reactors are simplicity of design and ease of maintenance. The results of a pilot study of the conductive pyrolysis process of sunflower husk showed that the obtained coal briquettes have a low ash content (6.2%), their maximum yield (29%) was achieved at a pressing pressure of 25 kg/cm², and the maximum density of the samples was 1139 kg/cm³ (pressing pressure 153 kg/cm²). It was found that an increase in pressing pressure from 20 to 150 kg/cm² leads to an increase in the density of coal briquettes by 16%, and the maximum value of compression pressure is 566 kg/cm². Also, at a compaction pressure of more than 50 kg/cm², the impact resistance index during discharge reaches 100%. The developed technology provides a large mass yield of coal briquettes with high quality characteristics, which indicates the promise of utilizing sunflower husk by conductive pyrolysis in the fuel feed for the metallurgical industry.

Key words: conductive pyrolysis, sunflower husk, high-strength coal briquettes, plant waste, alternative energy sources.

References

1. Nižetić S. Smart technologies for promotion of energy efficiency, utilization of sustainable resources and waste management / S. Nižetić, N. Djilali, A. Papadopoulos, J.P.C. Rodrigues // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 231. – № 10. – P. 565–591.

2. Martinho V.J.P.D. Interrelationships between renewable energy and agricultural economics: An overview / V.J.P.D. Martinho // Energy Strategy Reviews. – 2018. – Vol. 22. – № 10. – P. 396–409.

3. Herbert G.M.J. Quantifying environmental performance of biomass energy / G.M.J. Herbert, A.U. Krishnan // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2016. – Vol. 59. – P. 292–308.

4. Osman N. S. Sunflower shell waste as an alternative animal feed. / N. S. Osman [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – № 10. – P. 21905–21910.

5. Kuznetsov M.G. Mathematical modeling of a conical installation for wet grinding. [Matematicheskoe modelirovanie konicheskoy ustanovki dlya mokrogo izmelcheniya]. / M. G. Kuznetsov, V. V. Kharkov, N. Z. Dubkova // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. – The Herald of Technological University.* – 2016. – Vol. 19. – № 20. – P. 164–166.

6. Zabaniotou A. A. Sunflower shells utilization for energetic purposes in an integrated approach of energy crops: Laboratory study pyrolysis and kinetics / A. A. Zabaniotou, E. K. Kantarelis, D. C. Theodoropoulos // *Bioresource Technology.* – 2008. – Vol. 99 – P. 3174–3181.

7. Kharkov V.V. Features of modeling the process of dry fractionation of leguminous raw materials. [Osobennosti modelirovaniya protsessa sukhogo fraktsionirovaniya zernobobovogo syr'ya]. / V.V. Kharkov, A.N. Nikolaev // *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya. – Scientific and Technical herald of Volga Region.* – 2019. – № 9. – P. 7–14.

8. Grachev A. N. The technology of rapid pyrolysis in the energy use of low-quality wood. [Tekhnologiya bystrogo piroliza pri energeticheskom ispolzovanii nizkokachestvennoy drevesiny]. / A. N. Grachev and others // *Energetika Tatarstana. – Energy of Tatarstan.* – 2008. – № 4. – P. 16–20.

9. Bhaskar, T. Chapter 1 – Advances in Thermochemical Conversion of Biomass – Introduction / T. Bhaskar, A. Pandey // *Recent Advances in Thermo-Chemical Conversion of Biomass* / eds. A. Pandey [et al.]. – Boston: Elsevier, 2015. – P. 3–30.

10. Tuntsev, D. V. The mathematical model of fast pyrolysis of wood waste / D. V. Tuntsev, R. G. Safin, R. G. Hismatov, R. A. Halitov, V. I. Petrov // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – 2015. – С. 1–4.

11. Kharkov V.V. Thermochemical processing of sunflower husks. [Termokhimicheskaya pererabotka luzgi podsolnechnika]. / V. V. Kharkov, D. V. Tuntsev, M. G. Kuznetsov // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University.* – 2018. – Vol. 13. – № 4. – P. 130–134.

Authors:

Tuntsev Denis Vladimirovich - Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Wood Materials Processing Department, e-mail: tuncev_d@mail.ru

Kharkov Vitaliy Viktorovich - Senior Lecturer, Food Production Equipment Department, e-mail: v.v.kharkov@gmail.com
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Kuznetsov Maksim Gennadevich - Ph.D., Associate Professor of Economics and Information Technology Department, e-mail: max-genn@ya.ru

Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.