

УДК 628.475.7:631.863

ИВАНОВ ЮРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ, докт. техн. наук¹

E-mail: iy.electro@mail.ru

БЕЛОПУХОВ СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ, докт. сел.-хоз. наук¹

E-mail: belopuhov@mail.ru

ШАФЕЕВ АЛЬБЕРТ ФАРИТОВИЧ¹

E-mail: shafeev.af@yandex.ru

ВОРОБЬЕВ ВИКТОР АНДРЕЕВИЧ, докт. техн. наук¹

E-mail: tatiana49@mail.ru

¹ Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, 127550, Российская Федерация

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ КУРИНОГО ПОДСТИЛОЧНОГО ПОМЕТА

Одним из путей решения проблемы загрязнения окружающей среды пометом птицефабрик является его сжигание с получением тепловой энергии для собственных нужд. Однако из-за особенностей физико-химических свойств помета его прямое сжигание приводит к осложнениям, препятствующим долговременной и эффективной работе твердотопливных котлов. Для этого необходимо определение условий термического разложения подстилочного помета на основе определения энергии активации, которую необходимо учитывать при управлении режимами его сжигания в котлах. Исследования проведены на кафедрах автоматизации и механизации животноводства, а также физической и органической химии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. Исследованиями установили, что при нагревании чистого помета до 400 градусов Цельсия происходит всплеск выделения тепла, т.е. интенсивного горения летучих составляющих, в отличие от сжигания опилок или помета с опилками. Это может вызвать спекание частиц минеральных составляющих и образование агломератов, приводящих к их налипанию на конвективные поверхности, в том числе колосниковой решетки, что в свою очередь приводит к выходу из строя, остановке и ремонту твердотопливных котлов. Установили, что добавление опилок с целлюлозосодержащими компонентами с невысокими температурами разложения способствует снижению пиковых значений температур, колебаний температуры в топке и, как следствие, более равномерному процессу горения, что является положительным фактором. Проведенные термодинамические расчеты и экспериментальные измерения энергии активации компонентов сырья позволили оптимизировать температурные режимы горения в твердотопливных котлах, а состав поступающего воздуха с различными концентрациями кислорода позволили оптимизировать скорость горения, состав газовой фазы и компонентов, образующихся после сгорания.

Ключевые слова: подстилочный помет, термогравиметрический анализ, энергия активации, термическое разложение, утилизация, эндотермическая реакция, экзотермическая реакция.

Одним из путей решения проблемы загрязнения окружающей среды пометом птицефабрик является его сжигание с получением тепловой энергии для собственных нужд, что осложняется отсутствием котлов, специально предназначенных для термической утилизации помета, обладающего специфическими физико-химическими свойствами [1–14]. Для эффективной утилизации подстилочного помета в твердотопливных котлах и оптимизации режимов сжигания целесообразно провести его термический анализ.

Цель исследований – определение условий термического разложения подстилочного помета птицефабрик на основе определения энергии активации, которую необходимо учитывать при управлении режимами его сжигания в котлах. Исследования проведены на кафедрах автоматизации и механизации животноводства, а также физической и органической химии РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.

Материалы и методы. Методика исследований основана на динамическом термогравиметриче-

ском анализе, т.е. исследовании изменении массы подстильного помета и тепловых эффектов при различных температурах его нагрева.

Для проведения исследований применен дериваторграф Q-1500D. Образцами для исследований являются образец № 1 – птичий помет бройлеров с птицефабрики «ООО Загорский Бройлер»; образец № 2 – опилки древесные (береза); образец № 3 – помет с опилками, состоящий из 40...50% опилок и 60...50% куриного помета. Отходы переработки березы и сосны часто применяются в качестве подстилки, при этом характеристики термической деструкции их древесины достаточно хорошо изучены [10].

Методика работы предусматривает предварительную подготовку дериваторграфа к работе, калибровку прибора, проведение испытания, обработку экспериментальных кривых, расчеты и интерпретацию полученных результатов. При этом приняты скорость нагрева образца 20 град/мин., а верхний предел температуры нагрева – 1000°С.

При проведении исследований регистрируются параметры T, TG, DTG и ДТА (рис. 1). Время (t) откладывается по оси абсцисс. T – кривая (красная) температуры; TG – кривая (фиолетовая) потери массы образца при увеличении температуры; DTG – кривая (черная), является первой производной

дной термогравиметрической кривой и характеризует скорость потери массы; ДТА – кривая (зеленая), характеризует изменения эндотермических и экзотермических переходов в зависимости от температуры нагрева. Если при нагревании в образце не происходят физические или химические превращения, то кривая ДТА идет параллельно оси времени t. Если же изменяется физическое состояние образца или происходят термические превращения, то кривая ДТА отклоняется от базовой линии: для экзотермических реакций – вверх, для эндотермических – вниз. Соответственно на кривой появляются экзотермический пик (экзотерма) и эндотермический пик (эндотерма).

Начальная температура T_n – температура, при которой изменение массы образца достигает предела чувствительности термовесов и начинает превышать его, а конечная T_k – температура, при которой интегральное изменение массы в процессе (или на стадии) достигает максимума. Температурный интервал реакции определяют как разность конечной и начальной температур ($T_k - T_n$).

Результаты и обсуждение. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунках 1–3. Как следует из графиков (кривая ДТА) при термическом разложении биомассы (помет + опилки) сначала происходит дегидратация и удаление



Рис. 1. Термограмма образца № 1 – помет:
T – кривая (красная) температуры; TG – кривая (фиолетовая)
потери массы при увеличении температуры;
DTG – кривая (черная) скорости потери массы;
ДТА – кривая (зеленая) изменения эндотермических и экзотермических
переходов в зависимости от температуры

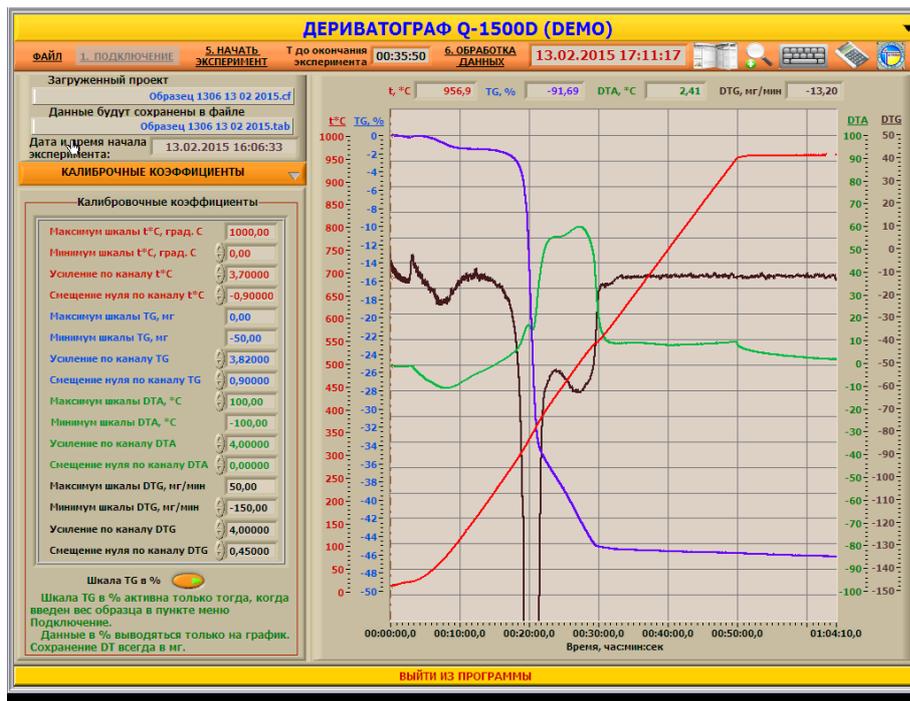


Рис. 2. Термограмма образца № 2 – опилки древесные

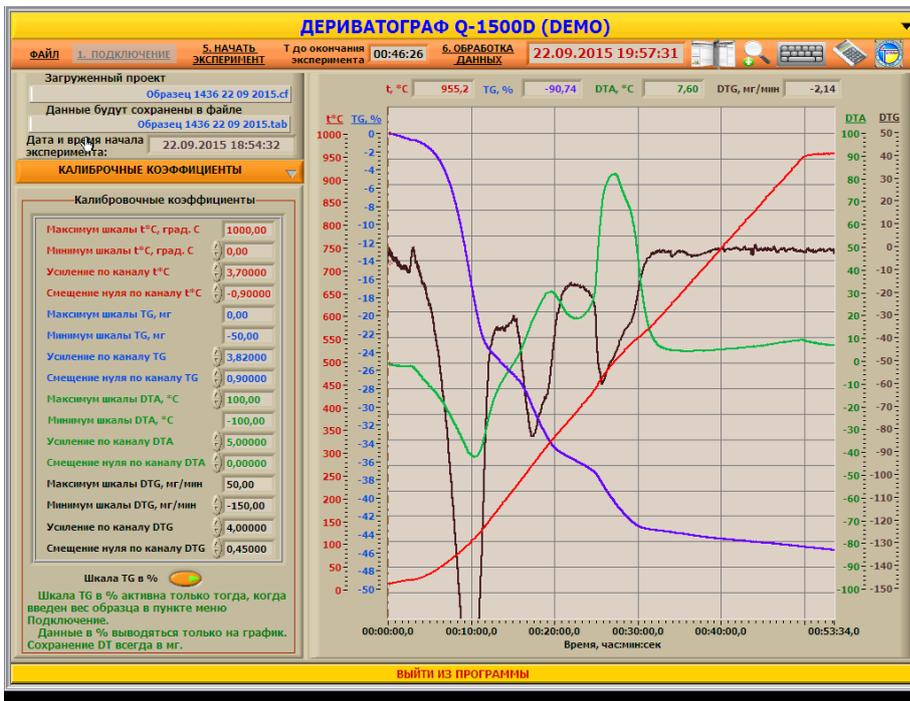


Рис. 3. Термограмма образца № 3 – помет с опилками

свободной и гигроскопической воды при температурах 80...140°C. Затем разрушаются гемицеллюлозы с малыми полимерными цепями (пентозаны) при 160...180°C, начинается разложение целлюло-

зы при 220...240°C. Это эндотермические реакции идут с затратой тепловой энергии. При этом необходимо учесть, что в составе газов, образующихся при сгорании 1 часть по объему составляет CO,

а 2 части CO₂. При температурах более 275°C целлюлоза саморазогревается из-за большого выделения теплоты в результате экзотермических реакций. В составе продуктов сгорания, по данным хроматографического анализа, присутствуют органические кислоты, спирты, кетоны. При температурах 400...450°C образуется углерод, который при повышенных температурах сгорает с образованием оксида углерода (II) и оксида углерода (IV). В продуктах сгорания также идентифицированы водород (до 3%), C₂H₄ (0,2...0,40%), CH₄ (0,27...0,64%), фенол и другие углеводороды.

При температурах 350...450°C начинаются процессы разложения лигнина, приводящие к образованию смолистых компонентов и углерода, а в состав газов входят CO (до 50%), метан (до 35%), CO₂ (до 10%).

Все эти процессы хорошо прослеживаются из результатов, полученных при термолитизе как индивидуальных компонентов сжигаемой нами биомассы (помет, опилки), так и реальных образцов подстилочного помета (рис. 1–3).

Из данных термогравиметрии видим, что общим для всех образцов является наличие двух диапазонов температуры: в первом наблюдается эндотермический эффект, связанный с испарением влаги (20...140°C), во втором происходит собственно термическое разложение вещества, сопровождающееся выделением теплоты.

Из сравнения графиков видим, что при сжигании чистого помета происходит всплеск выделения тепла, т.е. интенсивного горения летучих составляющих, в отличие от сжигания опилок или помета с опилками. Температурный всплеск при сжигании подстилочного помета может привести к спеканию частиц минеральных составляющих и образованию агломератов, приводящих к их налипанию на конвективные поверхности, в т.ч. колосниковой решетки, что приводит к выходу из строя, остановке и ремонту твердотопливных котлов. Следовательно, добавление опилок с целлюлозосодержащими компонентами с невысокими температурами разложения способствует снижению пиковых значений температур, колебаний температуры в топке и к более равномерному процессу горения подстилочного помета, что является положительным фактором.

Исследованиями установлено, что содержание органического вещества в опилках максимально и составляет 96,4%. При этом органика в помете составляет 79,3%, а в смеси помета с опилками – 63,1%.

Для расчетов термодинамических характеристик и параметров кинетического уравнения, оценки химического состава образцов сырья, поступающих на сжигание, использовано программное обеспечение Simulink пакета MathLab.

Энергия активации компонентов подстилочного помета рассчитывается из экспериментальных данных с использованием метода, основанного на формальном кинетическом уравнении:

Таблица

Изменение содержания органических компонентов в образцах сырья, %, при различных температурах их нагрева

Температура фазовых изменений, °C	Образец № 1 – помет, %	Образец № 2 – опилки, %	Образец № 3 – помет с опилками, %
90	4	–	–
100	–	3,2	–
108	–	–	30,9
198	–	–	19,1
276	–	–	8,7
280	40,3	–	–
325	12	11,3	7,4
430	–	–	–
460	5	–	–
469	–	–	9,3
504	–	74,8	–
538	–	–	7,8
540	12	–	–
>600	–	6,8	9,0
730	10	–	–

$$V_i = -dm/dT = (A/V_{\text{нагр}})e^{-E/RT} \cdot m^n, \quad (1)$$

где V_i – скорость термодеструкции; m – масса вещества, расходуемая в реакции разложения; $V_{\text{нагр}}$ – скорость нагревания; n – порядок реакции; A – предэкспоненциальный множитель; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Для расчета $E_{\text{акт}}$ используем метод Райха-Фюосса. Согласно этому методу расчет выполняют с использованием точки перегиба на термогравиметрической кривой ТГ, которую находят по кривой ТГП – первой производной кривой ТГ. Этой точке соответствуют параметры $V_{\text{макс}}$, $T_{\text{макс}}$, $m_{\text{макс}}$, входящие в уравнение прямой:

$$\lg V_i = \lg A + E/R[(m_{\text{макс}}/V_{\text{макс}} T_{\text{макс}}^2) \lg m - (1/2,3T)], \quad (2)$$

где $V_{\text{макс}}$ – максимальная скорость разложения; $T_{\text{макс}}$, $m_{\text{макс}}$ – температура и масса, соответствующие максимальной скорости разложения. Тангенс угла наклона этой прямой равен значению E/R .

Для расчета термодинамических характеристик разработана прикладная программа. При этом расчет проводится исходя из предположения, что такие реакции термического разложения относятся к

реакциям мономолекулярным, и для них кинетическое уравнение имеет вид:

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{k_0}{b} \cdot e^{-E/RT} \cdot C^n, \quad (3)$$

где C – доля вещества (A), принимающая участие в реакции и остающаяся в какой-нибудь ее стадии; $b = \frac{dT}{dt}$, k – константа скорости реакции из уравнения

$$k = k_0 \cdot e^{-E/RT}, \quad (4)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; n – порядок реакции; E – энергия активации, ккал/моль; $R = 1,987$ кал/моль·град; T – абсолютная температура, К.

В нашем случае в уравнении (3) используем значение $b = 20$, $n = 1$.

В результате обработки экспериментальных данных получены значения для энергии активации процессов сгорания биомассы, состоящей из 40...50% опилок и 60...50% куриного помета, для каждого компонента сырья. Результаты расчетов по определению энергии активации исследуемых образцов в зависимости от температуры нагрева, в характерных точках перегиба кривой ТГ, приведены на рисунках 4–6.

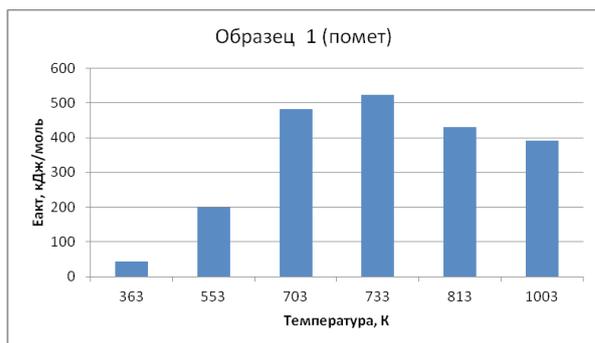


Рис. 4. Энергия активации воды и органических компонентов в зависимости от температуры (К), для образца № 1 – помет

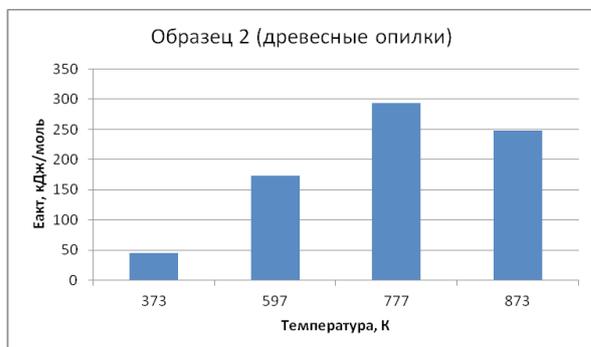


Рис. 5. Энергия активации воды и органических компонентов в зависимости от температуры (К), для образца № 2 – опилки



Рис. 6. Энергии активации воды и органических компонентов в зависимости от температуры (К), для образца № 3 – помет с опилками

Выводы. Проведенные термодинамические расчеты и экспериментальные измерения энергии активации компонентов сырья для установки позволяют определить затраты энергии на осуществление переходных процессов при деструкции подстилочного помета для оптимизации температурных режимов горения с мультizonовым сжиганием в твердотопливных котлах. При этом скорость горения состав газовой фазы и компонентов, образующихся после сгорания, можно оптимизировать за счет состава поступающего воздуха с различными концентрациями кислорода.

Библиографический список

1. Андреев С.А., Петрова Е.А. Оценка энергозатрат на озонирование топочного пространства водогрейных котлов // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2015. № 2 (66). С. 33–37.
2. Андреев С.А., Петрова Е.А. Исследование динамического баланса концентрации озона в топочной камере водогрейного котла // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2014. № 3. С. 11–13.
3. Белопухов С.Л., Шнее Т.В., Дмитриевская И.И. и др. Методические указания по проведению испытаний биологических объектов методом термического анализа. М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2014. 87 с.
4. Белопухов С.Л., Цыгуткин А.С., Штеле А.Л. Применение термоанализа для изучения зерна белого люпина // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 4. С. 56–58.
5. Горбачёв И.В., Кирсанов В.В., Шогенов Ю.Х. Модернизация животноводства на базе энергосберегающих технологических и технических решений // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 4. С. 2–4.
6. Иванов Ю.Г., Целиков В.В., Шафеев А.Ф. Особенности сжигания подстилочного помета при термической утилизации // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2015. № 1 (65). С. 25–30.

7. Иванов Ю.Г., Целиков В.В., Шафеев А.Ф. Особенности сжигания подстилочного помета в твердотопливных котлах // Вестник ВНИИМЖ. 2015. № 4 (20). С. 220–224.

8. Иванов Ю.Г., Целиков В.В., Шафеев А.Ф. Термическая утилизация птичьего помета // Сельский механизатор. 2015. № 9. С. 32–33.

9. Иванов Ю.Г. Экспериментальная установка для утилизации подстилочного помета и производства тепловой энергии: Труды 9-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». В 5 ч. Ч. 3. «Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике». Москва, 21–22 мая 2014 г. / Ю.Г. Иванов и др. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2014. С. 104–106.

10. Иванов Ю.Г. Экспериментальная установка для экологической утилизации подстилочного помета с выработкой тепловой энергии: Материалы Всероссийской научно-практической конференции,

посвященной памяти д.с.-х.н., профессора С.Г. Караева, «Актуальные вопросы науки и практики как основа производства экологически чистой продукции сельского хозяйства». Махачкала, 14–15 мая 2014 г. / Ю.Г. Иванов и др. Махачкала: Дагестанский ГАУ имени М.М. Джамбулатова, 2014. С. 186–193.

11. Калабашкина Е.В., Белопухов С.Л. Термохимический анализ льняного волокна // Бутлеровские сообщения. 2011. Т. 28. № 20. С. 11–14.

12. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискин А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород Средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17–30.

13. Кирсанов В.В. Механизация и автоматизация животноводства. Москва: Академия, 2004. 398 с.

14. Савич В.И., Седых В.А., Белопухов С.Л., Измайлова С.А. Изучение гумата калия из птичьего помета // Агрехимический вестник. 2012. № 4. С. 21–23.

Статья поступила 26.01.2016

STUDYING BURNING PROPERTIES OF CHICKEN LITTER

YURI G. IVANOV, DSc (Eng)¹

E-mail: iy.electro@mail.ru

SERGEY L. BELOPUKHOV, DSc (Ag)¹

E-mail: belopuhov@mail.ru

ALBERT F. SHAFEEV¹

E-mail: shafeev.af@yandex.ru

VIKTOR A. VOROBYOV, DSc (Eng)¹

E-mail: tatiana49@mail.ru

¹ Russian State Agrarian University - Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Timiryazevskaya str., 55, Moscow, 127550, Russian Federation

One of the ways of solving the problem of the environmental pollution is burning the litter of poultry farms to produce thermal energy for one's own needs. However, due to the litter physical and chemical properties, its direct combustion leads to complications, preventing long-term and efficient operation of solid fuel boilers. This requires the determination of the conditions of litter manure thermal decomposition on the basis of determining the activation energy, which must be taken into account in operating the combustion modes in boilers. The authors have conducted research studies at the Departments of Livestock Breeding Automation and Mechanization, as well as Physical and Organic Chemistry of RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev. The studies have found that heating of clean litter to 400 degrees Celsius leads to a surge of heat generation, i.e., intense burning of volatile components, as opposed to a case with burning of sawdust or manure mixed with sawdust. This can cause sintering of the particles of mineral components and the formation of agglomerates, which may lead to their sticking to convective surfaces including a fire grate, which in turn may lead to damage, failures and repair of solid fuel boilers. The research has also found that the introduction of cellulose with sawdust components with low decomposition temperatures contributes to the lowering of the peak temperature, temperature fluctuations in the furnace and, as a consequence, a more uniform combustion process, this being a positive factor. The thermodynamic calculations and experimental measurements of activation energy of input components provide for the optimization of the temperature of combustion modes in solid fuel boilers, and the composition of incoming air with different oxygen

concentrations provide for the optimization of combustion rate and the composition of gas phase components produced after combustion.

Key words: chicken litter, thermal gravimetric analysis, activation energy, thermal decomposition, waste recovery, endothermic reaction, exothermic reaction.

References

1. Andreyev S.A., Petrova Ye.A. Otsenka energozatrat na ozonirovanie topochnogo prostranstva vodogreynykh kotlov [Evaluation of energy consumption for ozonizing combustion chamber boilers // Herald of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education - Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin. 2015. № 2 (66). Pp. 33–37.
2. Andreyev S.A., Petrova Ye.A. Issledovanie dinamicheskogo balansa kontsentratsii ozona v topochnoy kamere vodogreynogo kotla [Studying the dynamic balance of the ozone concentration in the boiler combustion chamber] // Herald of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education - Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin. 2014. № 3. Pp. 11–13.
3. Belopukhov S.L., Shneye T.V., Dmitrevsky I.I. et al. Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu ispytaniy biologicheskikh obyektov metodom termicheskogo analiza [Guidelines for testing biological objects by thermal analysis]. M.: RSAU-MAA named after K.A. Timiryazev, 2014. 87 p.
4. Belopukhov S.L., Tsygutkin A.S., Shtele A.L. Primenenie termoanaliza dlya izucheniya zerna belogo lyupina [Application of thermal analysis for studying white lupine grain] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK [Advances in Science and Agribusiness Technology]. 2013. № 4. Pp. 56–58.
5. Gorbachev I.V., Kirsanov V.V., Shogenov Yu.Kh. Modernizatsiya zhivotnovodstva na baze energosberegayushchikh tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh resheniy [Modernization of livestock breeding on the basis of energy-saving technology and engineering solutions] // Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva [Farm Mechanization and Power Supply]. 2014. № 4. Pp. 2–4.
6. Ivanov Yu.G., Tselikov V.V., Shafeyev A.F. Osobennosti szhiganiya podstilochnogo pometa pri termicheskoy utilizatsii [Features of litter manure burning in thermal recycling] // Herald of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education - Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin. № 1 (65), 2015. Pp. 25–30.
7. Ivanov Yu.G., Tselikov V.V., Shafeyev A.F. Osobennosti szhiganiya podstilochnogo pometa v tverdotoplivnykh kotlakh [Features of litter manure burning in solid fuel fired boilers] // Herald of VNIIMZH [All-Russian Institute for Livestock Breeding Mechanization]. № 4 (20). 2015. Pp. 220–224.
8. Ivanov Yu.G., Tselikov V.V., Shafeyev A.F. Termicheskaya utilizatsiya ptich'ego pometa [Thermal utilization of poultry manure] // Selskiy Mekhanizator [Rural Mechanical Engineer]. 2015. № 9. Pp. 32–33.
9. Ivanov Yu.G. Eksperimental'naya ustanovka dlya utilizatsii podstilochnogo pometa i proizvodstva teplovoy energii [An experimental installation for disposal of litter accompanied with heat production]: Proceedings of the 9th International Scientific Conference "Energy Supply and Energy Efficiency in Agriculture." In 5 volumes. Vol. 3. "Energy-Saving Technologies in Animal Husbandry and Stationary Power Production." Moscow, 21–22 May, 2014 / Yu.G. Ivanov et al. M.: GNU VIESKh, 2014. Pp. 104–106.
10. Ivanov Yu.G. Eksperimental'naya ustanovka dlya ekologicheskoy utilizatsii podstilochnogo pometa s vyrabotkoy teplovoy energii [An experimental installation for ecological disposal of litter accompanied with heat production]: Materials of All-Russian scientific-practical conference dedicated to the memory of Professor S.G. Karayev, DSc (Ag), "Vital problems of Science and Practice as a Basis for Ecologically Clean Agricultural Production." Makhachkala, 14–15 May, 2014 / Yu.G. Ivanov et al. Makhachkala. Dagestan GAU named after M.M. Dzhambulatov, 2014. Pp. 186–193.
11. Kalabashkina Ye.V., Belopukhov S.L. Termochemicheskiy analiz l'nyanogo volokna [Thermochemical analysis of flax fiber] // Butlerovskie soobshcheniya [Butlerov's Communications]. 2011. Vol 28. № 20. Pp. 11–14.
12. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskin A.A. Termicheskiy analiz drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sredney Sibiri [Thermal analysis of the main kinds of timber in Central Siberia] // Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest Journal]. 2015. № 6. Pp. 17–30.
13. Kirsanov V.V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodstva [Mechanization and automation of livestock breeding]. Moscow: Akademia [Academy], 2004. 398 p.
14. Savich V.I., Sedykh V.A., Belopukhov S.L., Izmailov S.A. Izuchenie gumata kaliya iz ptich'ego pometa [The study of potassium humate from bird droppings] // Agrokhimicheskiy vestnik [Agrochemical Herald]. 2012. № 4. Pp. 21–23.

Received on January 26, 2016