

УДК 658.567.1
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5014
Шифр специальности ВАК: 2.4.6
Научная статья

Возможность использования теплоты газообразных продуктов пиролиза куриного помета для покрытия энергетических затрат птицефабрики

А.В. Астафьев¹, И.Д. Димитрюк^{1,2}, М.А. Гайдабрус¹, К.Т. Ибраева¹✉

¹Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉k.ibraeva@utmn.ru

Аннотация. *Актуальность* определяется необходимостью эффективной утилизации вторичных ресурсов птицефабрики, в частности куриного помета, с целью его экологического обезвреживания и последующего применения. *Цель.* Оценка возможности использования потенциальной теплоты газообразных продуктов, выделяющихся при пиролитической переработке куриного помета, для частичного или полного покрытия энергетических затрат птицефабрики. *Методы.* Теплотехнические характеристики исследуемого сырья определены согласно аттестованным методикам. Дифференциальный термический анализ проведен на синхронном термоанализаторе Netzsch STA 449 F5 Jupiter. Установление материального баланса пиролиза и компонентного состава газообразных продуктов выполнено при помощи проведения физических экспериментов. *Результаты и выводы.* При пиролитической переработке нативного куриного помета выход газообразных продуктов составляет 21,4 %, а их теплосодержание – 1,91 МДж на 1 кг перерабатываемого сырья. Создание композиций (в условиях предварительного смешивания компонентов и с использованием слоевой засыпки) на основе куриного помета (80 %) и опилок (20 %) приводит к положительному синергетическому эффекту – увеличивается выход пиролизного газа (29,7–31,3 %) и его теплосодержание (2,15–2,45 МДж/кг) относительно переработки нативного куриного помета. Установлено, что ежегодное количество вырабатываемой теплоты от сжигания газообразных продуктов пиролитической переработки в зависимости от вида исследуемого сырья составит 6,0–10,9 млн кВт·ч, что позволит покрыть энергозатраты птицефабрики на 46–84 %.

Ключевые слова: птицефабрика, энергозатраты, куриный помет, пиролиз, газообразные продукты

Благодарности: Аналитические исследования, физические эксперименты и интерпретация результатов по переработке нативного куриного помета осуществлены в рамках выполнения задач Госзадания (грант № FEWZ-2024-0013 «Научно-технические основы и прикладные решения ресурсоэффективной термической переработки органического сырья с получением продуктов с высокой добавленной стоимостью для энергетической, металлургической и сельскохозяйственной отраслей»). Исследование смесевых композиций на основе различных видов биомассы выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-79-01296 «Научно-технические основы технологии энергоэффективной пиролитической переработки смесевых композиций на основе различных комбинаций из нескольких видов биомассы с внедрением стадии адсорбции» (<https://rscf.ru/project/23-79-01296/>).

Для цитирования: Возможность использования теплоты газообразных продуктов пиролиза куриного помета для покрытия энергетических затрат птицефабрики / А.В. Астафьев, И.Д. Димитрюк, М.А. Гайдабрус, К.Т. Ибраева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 217–232. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5014

UDC 658.567.1
DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5014
Scientific paper

Possibility of using chicken litter pyrolysis gaseous products heat to cover poultry farm energy costs

A.V. Astafev¹, I.D. Dimitryuk^{1,2}, M.A. Gajdabrus¹, K.T. Ibraeva¹✉

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ k.ibraeva@utmn.ru

Abstract. Relevance. The need for effective utilization of secondary resources of poultry farms, in particular chicken litter, for its ecological neutralization and subsequent use. **Aim.** To assess the possibility of using potential heat at gaseous products released during chicken litter pyrolytic processing for partial or full coverage of poultry farm energy costs. **Methods.** Thermal characteristics of the studied raw materials were determined according to certified methods. Differential thermal analysis was carried out on a synchronous thermal analyzer Netzsch STA 449 F5 Jupiter. The material balance of pyrolysis and component composition of gaseous products were determined by physical experiments. **Results and conclusions.** At pyrolytic processing of native chicken litter, the yield of gaseous products is 21.4%, and their heat content is 1.91 MJ per 1 kg of processed raw material. Creation of compositions (in conditions of preliminary mixing of components and with the use of layer filling) on the basis of chicken manure (80%) and sawdust (20%) leads to a positive synergetic effect – the yield of pyrolysis gas (29.7–31.3%) and its heat content (2.15–2.45 MJ/kg) increase in relation to the processing of native chicken litter. It is established that the annual amount of generated heat from combustion of pyrolytic processing gaseous products, depending on the type of raw materials, will amount to 6.0–10.9 million kWh, which will cover the energy costs of poultry farm by 46–84%.

Keywords: poultry farm, energy costs, chicken litter, pyrolysis, gaseous products

Acknowledgements: Analytical studies, physical experiments and results interpretation of native chicken litter processing were carried out within the framework of the State assignment no. FEWZ-2024-0013 (Scientific and technical foundations and applied solutions for resource-efficient thermal processing of organic raw materials to obtain high value-added products for energy, metallurgical and agricultural industries). The study of blended compositions based on different types of biomass was supported by the Russian Science Foundation, project no. 23-79-01296 “Scientific and technical fundamentals of the energy-efficient pyrolytic processing for mixed compositions based on various combinations of several biomass types with the introduction of an adsorption stage” (<https://rscf.ru/project/23-79-01296/>).

For citation: Astafev A.V., Dimitryuk I.D., Gajdabrus M.A., Ibraeva K.T. Possibility of using chicken litter pyrolysis gaseous products heat to cover poultry farm energy costs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 6, pp. 217–232. DOI: 10.18799/24131830/2025/6/5014

Введение

Накопление вторичных ресурсов биомассы, таких как солома, опилки, скорлупа орехов, отходы отраслей птицеводства и разведения крупного рогатого скота, приводит к негативному влиянию на окружающую среду [1, 2]. Особенно сильно данная проблема касается птицефабрик, на которых накапливаются большие объемы отходов жизнедеятельности птиц [3–5]. Основная угроза связана с образованием большого количества куриного помета, являющегося средой обитания различных патогенных микроорганизмов, что относит его к третьему классу опасных веществ [6, 7]. Согласно статистике, на территории Российской Федерации функционирует более 500 птицефабрик [8, 9], а общее количество куриного помета, образующего-

ся в ходе их деятельности, оценивается более чем в 20 млн т в год [10, 11]. При этом только около 30 % от всего объема образующегося помета эффективно перерабатывается [12, 13], а оставшаяся часть складывается в помехохранилищах. На сегодняшний день под хранение помета занято более 2,4 млн га земли [11], что сопоставимо по площади с 3,3 млн футбольных полей, а экологический ущерб, согласно [9], оценивается в 150 млрд р. Кроме того, согласно Постановлению Правительства РФ от 13.09.2016 г. № 913, с птицефабрик взимается плата за хранение помета в размере 1327 р./т. Более того, в 2024 г. одобрен закон, согласно которому за неправильное хранение и отсутствие утилизации куриного помета на предприятия налагаются штрафные санкции (в случае причинения вреда

окружающей среде или здоровью людей) [14]. Также стоит отметить, что при естественном разложении помета, полученного в ходе деятельности средней птицефабрики, в течение года в атмосферу выделяется более 600 т парниковых газов и более 30 т сероводорода, аммиака и других вредных соединений, общий ущерб экосистеме от которых составляет около 400 млн р. [15]. Следовательно, отсутствие или неэффективная утилизация помета приводит к возникновению дополнительных значительных затрат для предприятий и наносит колоссальный экологический ущерб.

Тюменская область занимает одно из лидирующих мест в Сибири и на Урале по производству яиц и мяса птицы [16], поэтому проблема утилизации помета является актуальной для региона. В контексте данной проблемы следует отметить, что большая доля (до 30 %) в себестоимости продукции птицеводческой отрасли приходится на энергозатраты предприятия [17, 18]. Одним из возможных вариантов внедрения технологий по эффективной утилизации куриного помета является перевод птицефабрик на автономное энергообеспечение за счет утилизации вторичных ресурсов, образующихся в ходе их деятельности [19]. Это связано с тем, что использование энергетического потенциала куриного помета позволит снизить зависимость от централизованного энергоснабжения и минимизировать затраты на электроэнергию. Таким образом, актуальной задачей является повышение эффективности технологий утилизации помета с целью его экологического обезвреживания и последующего применения.

Эффективным методом переработки куриного помета, согласно [20, 21], является пиролиз, при котором образуются твердые, жидкие и газообразные продукты. С экологической точки зрения процесс пиролиза помета обладает лучшими показателями по сравнению с другими методами его утилизации. Например, при естественном компостировании выделяется аммиак, сероводород и другие опасные вещества [12, 22], а при сжигании – оксиды серы, азота, фуран и диоксины [23]. Помимо этого, процесс компостирования достаточно трудоемкий и требует значительных затрат, а перевозка компоста и внесение его в почву сопровождаются эмиссией азота в атмосферу [17, 24, 25]. Проблемы при сжигании куриного помета помимо вредных выбросов обусловлены специфическими характеристиками данного вида биомассы, что приводит к низкой теплотворной способности и усложняет организацию процесса. В связи с тем, что высокая степень минерализации, низкая температура плавления и летучесть зольно-шлаковых компонентов при сжигании помета приводит к высокой степени шлакования и коррозии котельного оборудования, для повышения эффек-

тивности переработки данным методом необходима его модернизация [26, 27].

Важным преимуществом пиролитической переработки куриного помета является тот факт, что полученный в процессе пиролиза углеродистый остаток приобретает характеристики дезодорированного продукта, свободного от патогенов [17]. При этом в зависимости от параметров переработки изменяется состав получаемых продуктов, например, применение низкотемпературного пиролиза позволяет добиться минимального содержания основных азотсодержащих соединений в выделяющемся газе – аммиака (NH_3) и синильной кислоты (HCN), так как большая часть азота остается в углеродистом остатке [28]. Кроме того, одним из положительных эффектов от внедрения пиролиза биоресурсов является возможность получения высококалорийных газообразных продуктов [19, 29], теплота которых может быть использована для покрытия собственных нужд технологии. В связи с этим целью работы является оценка возможности использования потенциальной теплоты газообразных продуктов, выделяющихся при пиролитической переработке куриного помета, для частичного или полного покрытия энергетических затрат птицефабрики.

Методика исследования

Объект исследования

Объектом исследования являются два вида биоресурсов различного происхождения – вторичные ресурсы (куриный помет) одной из крупных птицефабрик Тюменской области и древесная биомасса (сосновые опилки древесины хвойных пород). Сосновые опилки рассмотрены в связи с тем, что на птицефабриках используется два способа содержания птицы – клеточное и напольное. При напольном содержании обязательным условием является использование подстилки, наиболее эффективным материалом для которой считается древесная биомасса хвойных пород. Преимущества данного вида биомассы заключаются в его хороших влагопоглощательных и антисептических свойствах, а также доступности и удобстве использования [30].

Для определения внешней влаги исследуемое сырье выдерживали до воздушно-сухого состояния (до постоянной массы) в сушильном шкафу ШС-80-02 (Россия) при температуре 40 °С согласно ГОСТ Р 52911-2013, после чего измельчали на лабораторной мельнице VLM-25 (Вилитек, Россия) и механически просеивали с использованием набора сит с целью отделения фракции 0,5–1,0 мм.

Теплотехнические характеристики исследуемого сырья и твердых продуктов его пиролиза (углеродистого остатка) определяли согласно аттестованным методикам, утвержденным соответствующими госу-

дарственными стандартами: зольность – по ГОСТ Р 56881-2016, влажность – по ГОСТ Р 33503-2015, выход летучих веществ – по ГОСТ Р 55660-2013. Теплота сгорания определена на бомбовом калориметре АБК-1В (РЭТ, Россия) в соответствии с ГОСТ 147-2013 (систематическая погрешность калориметра составляет $\pm 0,1$ % согласно паспорту прибора), элементный состав (C, H, N, S) – на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия) – точность прибора составляет $\leq 0,1$ %. Теплоемкость исследуемого сырья и твердых продуктов его пиролиза определена на анализаторе температуропроводности Discovery Laser Flash 1 с высокотемпературной приставкой EM-1200 (TA Instruments, США) – предел воспроизводимости $\pm 3,5$ %. При анализе из каждого вида сырья подготавливали три образца, по результатам измерений которых подсчитывали среднее значение и среднее квадратичное отклонение.

Погрешность результатов измерений (элементный состав органической части, теплоемкость), выполненных с использованием приборной базы, и результатов экспериментальных исследований (состав пиролизного газа) оценивали статистическим методом согласно ГОСТ Р 8.736-2011. Оценку погрешности результатов измерений (влажность, зольность, выход летучих веществ и низшая теплота сгорания), полученных по нормативным методикам ГОСТ, выполняли с учетом показателя воспроизводимости согласно РМГ 61-2010.

Дифференциальный термический анализ

Для проведения аналитического исследования образцов использовались методы термогравиметрического анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии, выполненные на синхронном термоанализаторе STA 449 F5 Jupiter (Netzsch, Германия). Систематическая погрешность для синхронного термоанализатора: предел допускаемой относительной погрешности измерений температуры $\pm 1,5$ %; удельной теплоты фазовых переходов ± 3 %; массы ± 1 %. Для анализа использовали образец воздушно-сухого сырья массой 5 мг, равномерно распределенного по дну корундового тигля с крышкой. Для создания инертной атмосферы и минимизации влияния окисления на результаты анализа систему дегазировали и двукратно заполнили аргоном. Образец нагревали со скоростью 10 °C/мин до 800 °C в среде аргона с потоком 50 мл/мин. Анализ проводили в трех повторностях для исследуемого сырья, в качестве результирующей (представленной в работе) взята средняя из них.

Физический эксперимент

Физические эксперименты по пиролизной переработке исследуемого сырья проводили на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

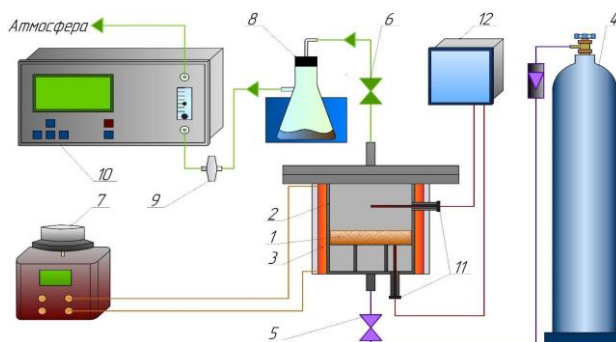


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки для проведения физических экспериментов: 1 – исследуемое сырье; 2 – лабораторный реактор; 3 – нагревательный элемент; 4 – баллон с азотом; 5, 6 – регулирующие краны; 7 – лабораторный автотрансформатор; 8 – колба для осаждения жидких продуктов; 9 – фильтр из фторопласта; 10 – газоанализатор Тест 1 (БОНЭР, Россия); 11 – термопары типа ХА; 12 – регистратор температуры многоканальный РМТ 19 (ЭЛЕМЕР, Россия)

Fig. 1. Schematic diagram of the laboratory installation for physical experiments: 1 – raw material; 2 – laboratory reactor; 3 – heating element; 4 – nitrogen cylinder; 5, 6 – regulating valves; 7 – laboratory autotransformer; 8 – flask for precipitation of liquid products; 9 – fluoroplastic filter; 10 – gas analyzer Test 1 (Boner, Russia); 11 – Cr-Al thermocouples; 12 – multichannel temperature recorder RMT 19 (Elemer, Russia)

Для осуществления эксперимента из фракции сырья (0,5–1,0 мм) подготавливали навеску массой 20 грамм и загружали в реактор – 2. После герметичного закрытия реактор продували азотом – 4 для создания инертной атмосферы, затем на время эксперимента перекрывали регулирующий кран – 5. Нагрев реактора осуществлялся с темпом 10 °C/мин до достижения температуры 600 °C, после чего проводилась выдержка при данной температуре до завершения выделения летучих продуктов как в жидком, так и в газообразном состоянии. Жидкие продукты, образующиеся в процессе нагрева, конденсировались в охлаждаемой колбе – 8, в то время как газовые фракции через фильтр – 9 направлялись на вход газоанализатора – 10 для определения концентраций составляющих. Согласно паспорту прибора газоанализатора пределы допускаемой основной погрешности для основных компонентов составляют: H_2 ($\pm 0,3$ %), CH_4 ($\pm 0,3$ %), CO_2 ($\pm 0,2$ %), CO ($\pm 0,3$ %). По завершении эксперимента реактор охлаждали естественным образом до комнатной температуры, после чего твердые и жидкие продукты извлекали и взвешивали. Материальный баланс пиролиза устанавливали согласно ГОСТ 3168-93, при этом количественный выход газообразных продуктов определяли согласно закону сохранения

масс, вычитая из массы исходного сырья сумму масс твердых и жидких продуктов. Теплоту сгорания пиролизного газа определяли по формуле смешения [31], исходя из концентраций и теплоты сгорания отдельных компонентов в его составе.

Физические эксперименты проводили для нативного куриного помета, а также для имитации пометно-подстилочной массы, включающей 20 % опилок, что является средним количественным показателем используемой подстилки согласно литературным данным [32, 33]. При этом имитация пометно-подстилочной массы рассмотрена в качестве предварительного смешивания компонентов, также для сравнения рассмотрена слоевая засыпка (нижний слой – куриный помет, верхний – древесные опилки).

Каждая серия физических экспериментов проведена в трех повторностях с целью возможности оценки погрешности получаемых результатов.

Обсуждение результатов

Характеристики исследуемого сырья

Согласно результатам определения теплотехнических характеристик (табл. 1), исследуемым видам биомассы присущ высокий выход летучих веществ, превышающий 83 %. Этот факт свидетельствует о термической нестабильности их органической части, что является положительным фактором при температурном воздействии.

Одним из ключевых параметров при оценке потенциала энергетического использования биомассы является значение зольности. Куриный помет характеризуется высокой зольностью ($A^d=24,3$ %), что обуславливает его сравнительно низкую теплоту сгорания – 11,0 МДж/кг. Кроме того, в курином помете отмечено повышенное содержание азота (6,94 %). Древесные опилки отличаются низкой зольностью ($A^d=0,9$ %), а высокое содержание углерода (51,42 %) и водорода (6,03 %) обеспечивает высокую теплоту сгорания (17,1 МДж/кг), характерную для биоресурсов.

Анализ теплофизических свойств исследуемого сырья выявил, что удельная теплоемкость низкозольных древесных опилок составляет 2238,1 Дж/(кг·К), что в 1,5 раза превышает аналогичный показатель для высокозольного куриного помета. Вариативность значений теплоемкости различных видов биомассы обусловлена различиями в их элементном составе и плотности. Предполагается, что разница связана с преобладанием органических компонентов в структуре древесной биомассы, в то время как куриный помет характеризуется повышенным содержанием азотсодержащих и минеральных соединений. Поскольку минеральные компоненты, как правило, обладают меньшей удельной теплоемкостью, по сравнению с органи-

ческими, увеличение их доли приводит к снижению общей теплоемкости материала. Теплоемкость является критическим параметром при определении количества тепловой энергии, необходимого для осуществления процесса пиролиза биомассы. В связи с этим полученные результаты указывают на то, что для термической деструкции куриного помета требуется меньший подвод тепла по сравнению с древесными опилками.

Таблица 1. Теплотехнические, теплофизические характеристики и элементный состав исследуемого сырья

Table 1. Proximate and ultimate analysis of raw materials

Характеристика Parameter	Куриный помет Chicken litter	Древесные опилки Sawdust	Куриный помет + древесные опилки Chicken litter + sawdust 80/20 %
Влага внешняя External moisture W^{ex} , %	62,1±1,1	12,0±1,1	–
Влажность аналитическая Analytical moisture W^{a} , %	9,9±0,1	7,2±0,1	9,4±0,1
Зольность на сухую массу Ash content on dry basis A^{d} , %	24,3±1,8	0,9±0,1	18,9±1,4
Выход летучих веществ Volatile matter yield Y^{daf} , %	87,8±2,5	83,6±2,4	86,5±2,5
Низшая теплота сгорания Q_{r} , МДж/кг Low calorific value Q_{r} , MJ/kg	11,0±0,2	17,1±0,2	12,4±0,2
Элементный состав на сухую массу Elemental composition on dry basis, %			
C^{d}	33,54±0,11	51,42±0,04	37,33±0,15
H^{d}	4,70±0,04	6,03±0,06	4,84±0,04
N^{d}	6,94±0,04	0,05±0,01	5,53±0,04
S^{d}	0,68±0,02	следы/traces	0,52±0,06
O^{d}	29,84±0,16	41,60±0,03	32,88±0,12
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К) Heat capacity C_p , J/(kg·K)	1482,9±11,7	2238,1±126,1	1633,9±23,7

Дифференциальный термический анализ

Согласно результатам дифференциального термического анализа нативного куриного помета (рис. 2) активная стадия разложения приходится на температурный интервал 200–600 °С. Данный факт подтверждается скоростью потери массы согласно ТГ-кривой – до 200 °С она составляет 0,054 % на 1 °С, что связано с испарением влаги и выделением легколетучих компонентов. При дальнейшем нагре-

ве скорость разложения возрастает в 2,2 раза и до 600 °C составляет 0,119 % на 1 °C, после чего значительно падает до 0,042 % на 1 °C в температурном интервале 600–800 °C. Аналогичная тенденция наблюдается при разложении смесевой композиции на основе куриного помета с добавлением 20 % опилок (рис. 2). При этом скорость разложения в активной стадии деструкции выше аналогичного значения для куриного помета и составляет 0,133 % на 1 °C. Это связано с преимущественным содержанием менее устойчивых к температурному воздействию органических компонентов (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина) в составе древесной биомассы по сравнению с куриным пометом [34].

В связи с тем, что на окончание активной стадии разложения сырья и выделения основной доли летучих продуктов пиролиза приходится температура 600 °C, данное значение выбрано максимальным при проведении физических экспериментов.

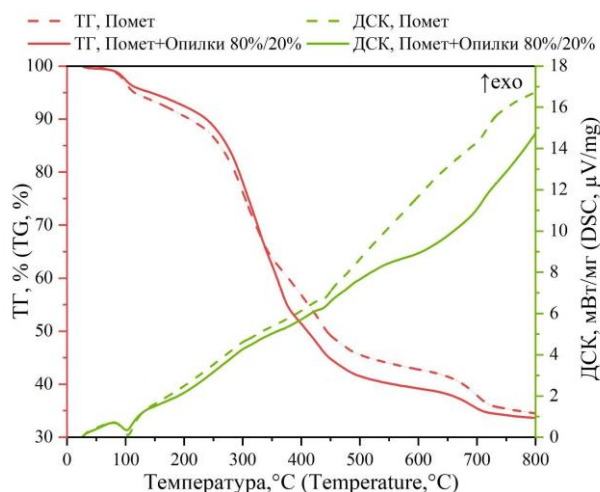


Рис. 2. Кривые дифференциального термического анализа исследуемых образцов

Fig. 2. Curves of differential thermal analysis of the studied samples

Характеристики твердых и газообразных продуктов пиролиза

Анализ распределения продуктов пиролиза исходного куриного помета (рис. 3) показал, что наибольший выход наблюдается для твердого углеродистого остатка. Согласно результатам определения его элементного состава (табл. 2) отмечено высокое содержание азота. Это связано с тем, что рассмотрен низкотемпературный пиролиз, что свидетельствует о низкой степени конверсии данного компонента в газообразные составляющие. Разложение органической части биомассы приводит к уменьшению значений выхода летучих веществ и теплоемкости твердых продуктов пиролиза по сравнению с исходной биомассой.

Выход жидких продуктов, включающих в себя пирогенетическую воду и смолу, составляет 29,2 %, выход газообразных продуктов – 21,4 %.

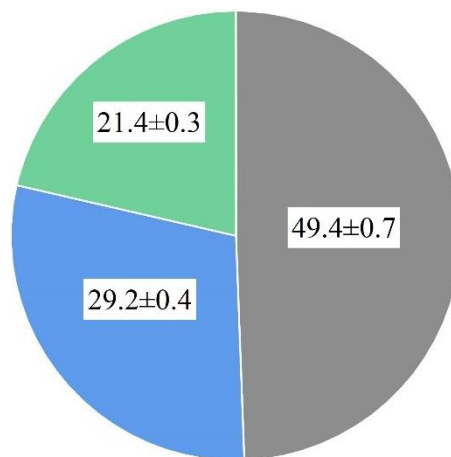


Рис. 3. Материальный баланс пиролиза нативного куриного помета

Fig. 3. Material balance of native chicken litter pyrolysis

Таблица 2. Теплотехнические, теплофизические характеристики и элементный состав твердых продуктов пиролиза исследуемого сырья

Table 2. Proximate and ultimate analysis of solid pyrolysis products

Характеристика Parameter	Куриный помет Chicken litter	Древесные опилки Sawdust
Влажность аналитическая Analytical moisture W^a , %	1,6±0,1	2,9±0,1
Зольность на сухую массу Ash content on dry basis A^d , %	41,0±3,0	2,7±0,2
Выход летучих веществ Volatile matter yield V^{daf} , %	39,3±1,1	26,7±0,8
Низшая теплота сгорания Q_f^r , МДж/кг Low calorific value Q_f^r , MJ/kg	12,5±0,2	28,4±0,2
Элементный состав на сухую массу Elemental composition on dry basis, %		
C^d	32,80±0,29	75,51±1,89
H^d	0,95±0,16	3,50±0,26
N^d	3,60±0,12	0,68±0,03
S^d	0,65±0,04	следы/traces
O^d	21,00±0,22	17,61±1,67
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·K) Heat capacity C_p , J/(kg·K)	1080,9±11,1	1925,5±51,1

Учитывая результаты аналитических исследований для проведения физических экспериментов по установлению состава газообразных продуктов максимальной температурой нагрева выбрано зна-

чение в 600 °С. Это связано с тем, что до этой температуры практически заканчивается выход летучих продуктов (рис. 2). При этом начальной точкой записи концентраций на газоанализаторе выбрана температура 200 °С, соответствующая началу активного разложения исследуемого сырья.

На рис. 4, а представлено изменение концентраций основных компонентов в составе пиролизного газа куриного помета в процессе нагрева. Следует отметить, что выделение CO_2 и CO происходит во всем рассматриваемом температурном интервале (200–600 °С). При этом значительному увеличению концентраций CH_4 и H_2 соответствует время 1500 секунд (температура 450 °С). Расчет средних концентраций компонентов в составе пиролизного газа произведен на основании интегральных площадей под соответствующими кривыми – полученные результаты представлены на рис. 4, б. Суммарная доля горючих компонентов (CO , H_2 , CH_4) составляет 46 %, благодаря чему теплота сгорания газооб-

разных продуктов равна 12 МДж/м³. Учитывая количественный выход газа (рис. 3) и его плотность при пересчете на 1 кг перерабатываемого помета данное значение эквивалентно 1,91 МДж.

Как упоминается выше, для проведения пиролитической переработки необходим подвод теплоты. В связи с этим, согласно [35], рассчитаны тепловые затраты для реализации пиролиза куриного помета, которые составили 0,88 МДж/кг. Таким образом, с учетом покрытия собственных затрат, необходимых для пиролиза куриного помета, оставшаяся потенциальная теплота газообразных продуктов составляет 1,03 МДж при переработке 1 кг сырья.

На рис. 5 представлены материальные балансы пиролиза рассматриваемых смесей. Следует отметить, что создание композиций на основе куриного помета и опилок приводит к положительному синергетическому эффекту – увеличивается выход пиролизного газа за счет уменьшения доли жидких и твердых продуктов.

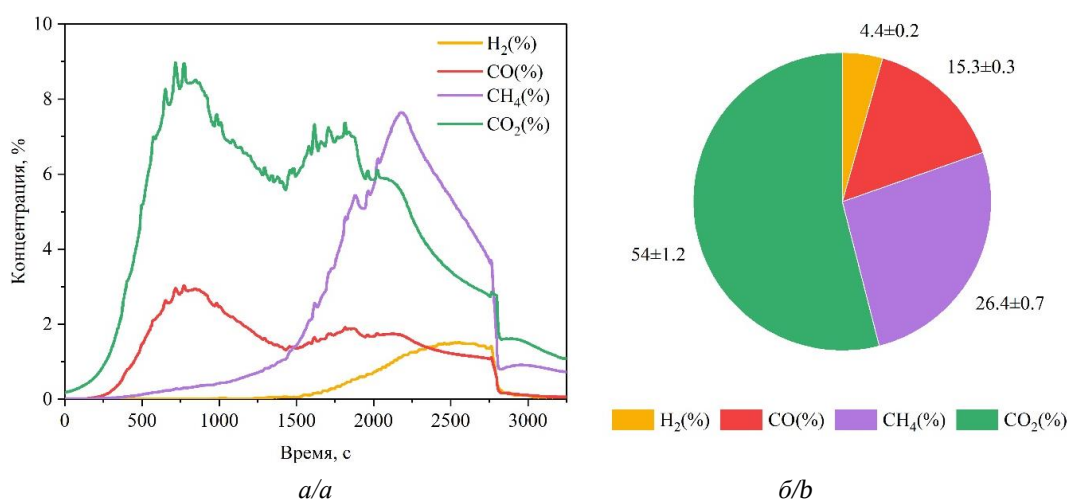


Рис. 4. Состав газа пиролиза нативного куриного помета: а) в процессе нагрева; б) средние концентрации
Fig. 4. Gas composition of native chicken litter pyrolysis: а) during heating; б) average concentrations



Рис. 5. Материальный баланс пиролиза куриного помета с добавлением опилок в соотношении 80/20 %: а) слоевая засыпка; б) смешивание компонентов
Fig. 5. Material balance of chicken litter pyrolysis with sawdust addition in the ratio of 80/20%: а) layer filling; б) mixing of components

В табл. 3 представлены результаты определения теплотехнических, теплофизических характеристик и элементного состава твердых продуктов пиролиза рассматриваемых смесевых композиций. Полученные значения являются близкими к характеристикам углеродистого остатка нативного куриного помета в связи с тем, что на его долю приходится преимущественное содержание (80 %) в составе смесей.

Таблица 3. Теплотехнические, теплофизические характеристики и элементный состав твердых продуктов пиролиза исследуемых смесевых композиций

Table 3. Proximate and ultimate analysis of compositions pyrolysis solid products

Характеристика Parameter	Куриный помет + древесные опилки Chicken litter + sawdust 80/20%	
	Слоевая засыпка Layers	Смешивание компонентов Mixing of components
Влажность аналитическая Analytical moisture W^a , %	1,8±0,1	1,9±0,1
Зольность на сухую массу Ash content on dry basis A^d , %	32,5±2,4	36,1±2,7
Выход летучих веществ Volatile matter yield V^{daf} , %	33,0±0,9	36,5±1,0
Низшая теплота сгорания Q_r , МДж/кг Low calorific value Q_r , MJ/kg	15,1±0,2	11,8±0,2
Элементный состав на сухую массу Elemental composition on dry basis, %		
C^d	42,53±0,68	40,96±0,55
H^d	1,28±0,13	1,09±0,11
N^d	1,76±0,19	1,60±0,14
S^d	0,54±0,06	0,77±0,08
O^d	21,39±0,40	19,48±0,29
Теплоемкость C_p , Дж/(кг·К) Heat capacity C_p , J/(kg·K)	1242,9±37,5	

На рис. 6, а, 7, а представлено изменение концентраций основных компонентов в составе пиролизного газа смесевых композиций в процессе нагрева. На рис. 6, б, 7, б представлены усредненные по интегральным площадям концентрации компонентов газообразных продуктов пиролиза куриного помета с добавлением опилок. Среди горючих компонентов следует отметить, что по сравнению с составом газообразных продуктов пиролиза нативного куриного помета незначительно увеличивается доля CO , при этом также на малый процент снижается концентрация CH_4 и H_2 . В совокупности с большим по сравнению с пиролизом нативного куриного помета количественным выходом пиролизного газа (рис. 5) удельная величина теплосодержания (на 1 кг перерабатываемой смеси) увеличивается и составляет 2,15 МДж для засыпки с предварительным смешиванием компонентов и 2,45 МДж для слоевой засыпки.

Учитывая, что теплоемкость древесины и твердых продуктов ее пиролиза больше аналогичных значений для куриного помета (табл. 1, 2), тепловые затраты пиролиза смесевых композиций с добавлением опилок возрастают до 0,95 МДж/кг. При этом с учетом покрытия собственных затрат пиролиза оставшаяся потенциальная теплота газообразных продуктов превышает аналогичное значение, полученное при рассмотрении переработки нативного куриного помета, и составляет 1,2 и 1,5 МДж относительно 1 кг перерабатываемого сырья при смешивании компонентов и при слоевой засыпке, соответственно.

Полученные значения потенциальной теплоты газообразных продуктов, которая может быть использована для покрытия энергозатрат птицефабрики, переведены в кВт·ч – соответствующие коэффициенты отражены на рис. 8.

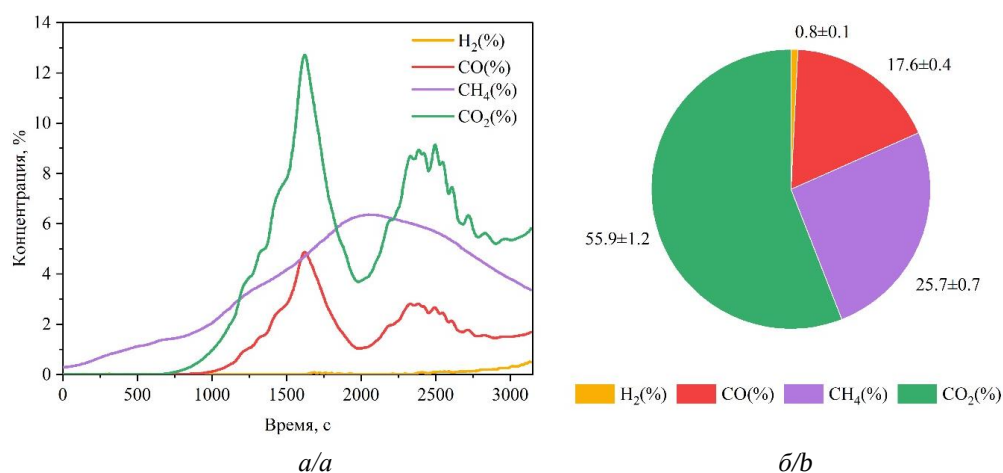


Рис. 6. Состав газа пиролиза куриного помета с добавлением опилок в соотношении 80/20 % (слоевая засыпка): а) в процессе нагрева; б) средние концентрации

Fig. 6. Gas composition of chicken litter pyrolysis with sawdust addition in the ratio of 80/20 % (layer filling): а) during heating; б) average concentrations

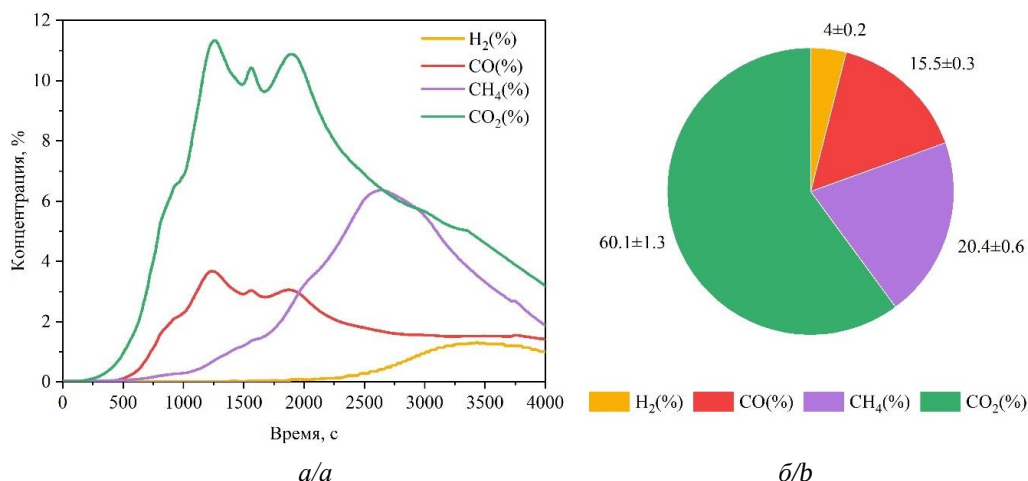


Рис. 7. Состав газа пиролиза куриного помета с добавлением опилок в соотношении 80/20 % (смешивание компонентов): а) в процессе нагрева; б) средние концентрации

Fig. 7. Gas composition of chicken litter pyrolysis with sawdust addition in the ratio of 80/20% (mixing of components): а) during heating; б) average concentrations

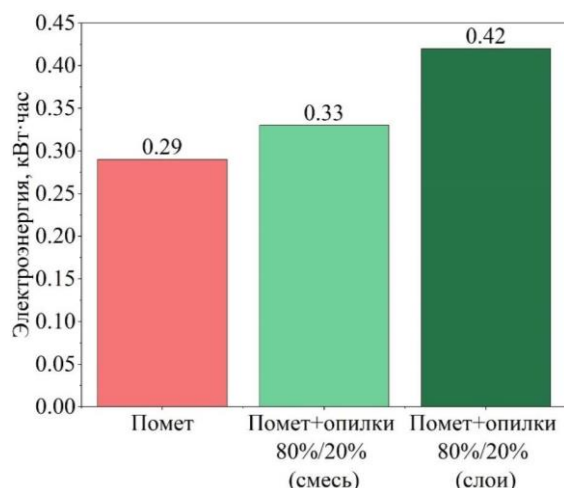


Рис. 8. Количественные показатели потенциальной теплоты газообразных продуктов пиролиза для покрытия энергозатрат птицефабрики (относительно 1 кг перерабатываемого сырья)

Fig. 8. Quantitative indicators of gaseous pyrolysis products potential heat to cover energy costs of a poultry farm (relative to 1 kg of processed raw materials)

Расчет энергозатрат птицефабрики и оценка использования потенциальной теплоты газообразных продуктов пиролиза для их покрытия

Оставшаяся после покрытия затрат тепловой энергии для осуществления пиролиза часть тепло-содержания газообразных продуктов является значительной (рис. 8). В связи с этим дополнительным фактором эффективности технологии пиролиза является оценка возможности ее использования для покрытия энергетических затрат птицефабрики. Для этого изначально необходимо рассчитать годовую потребность предприятия в электроэнергии.

Затраты электроэнергии на птицефабрике зависят от нескольких факторов – типа содержания птицы (клеточного или напольного), а также сезона (летнего или зимнего). Учитывая смешанный тип содержания птиц на птицефабрике Тюменской области, в табл. 4 сведено количество электроэнергии, необходимой для содержания одной курицы в зависимости от условий [36].

Таблица 4. Энергозатраты птицефабрики [36, 37]

Table 4. Energy costs of the poultry farm [36, 37]

Энергозатраты Energy costs		Тип содержания Content type	
		напольное floor	клеточное cage
Сезон Season	лето, кВт·ч в месяц summer, kWh per month	0,9	0,3
	зима, кВт·ч в месяц winter, kWh per month	1,1	0,6
Итого, кВт·ч в год на 1 курицу Total kWh per year per chicken:		12,0	5,4
Поголовье, тыс. шт./Population, th. pcs.		750	750
Итого, млн кВт·ч в год Total, mln kWh per year		13	

При поголовье птицефабрики [37] суммарные энергозатраты предприятия составляют около 13 млн кВт·ч в год.

Для расчета суммарного потенциального тепло-содержания газообразных продуктов необходимо оценить ежегодное количество образующегося куриного помета:

$$m_{\text{п}} = n_{\text{к}} \cdot m_{\text{п}}^{\text{к}} \cdot 365,$$

где $n_{\text{к}}$ = 1,5 млн шт. – поголовье птицефабрики [37]; $m_{\text{п}}^{\text{к}}$ = 200 г – количество помета в сутки от одной курицы [38, 39].

Количество сухого помета определяется по формуле:

$$m_{\text{сп}} = m_{\text{п}} - (W^{\text{ex}} - W^{\text{a}}) \cdot m_{\text{п}},$$

где W^{ex} ; W^{a} – внешняя и аналитическая влага куриного помета (табл. 1).

При удельных на 1 кг сырья показателях потенциальной теплоты газообразных продуктов пиролиза (рис. 8), суммарное теплосодержание пиролизного газа в зависимости от вида исследуемого сырья составит 15,0–27,2 млн кВт·ч/год, что позволит полностью покрыть энергозатраты птицефабрики. Однако средний коэффициент полезного действия (КПД) работы установок, использующих пиролизный газ для производства электроэнергии, составляет 40 % [40]. В связи с этим в табл. 5 сведены суммарные значения теплосодержания газообразных продуктов с учетом КПД их использования. Ежегодное количество вырабатываемой теплоты от сжигания газообразных продуктов пиролиза в зависимости от вида исследуемого сырья вычислено путем перемножения удельных показателей потенциальной теплоты пиролизного газа (рис. 8) на ежегодно образующееся количество сырья ($m_{\text{сп}}$) и КПД переработки газообразных продуктов в электроэнергию. После этого для полученных величин выполнен расчет доли покрытия относительно суммарных энергозатрат птицефабрики (табл. 4).

Стоит отметить, что ежегодное количество вырабатываемой теплоты от сжигания газообразных продуктов пиролизической переработки исследуемого сырья составит 6,0–10,9 млн кВт·ч, а доля покрытия энергозатрат птицефабрики – 46–84 %. При этом доля покрытия энергозатрат возрастает в 1,5 и 1,8 раз при использовании засыпки с предварительным смешиванием компонентов и слоевой засыпки, соответственно, по сравнению с аналогичной величиной для газообразных продуктов пиролиза нативного куриного помета.

Также стоит отметить, что высокая доля тепловых затрат приходится на сушку биомассы перед проведением ее пиролизической переработки [17]. Влажность пиролизуемого сырья может варьироваться в широких пределах. При этом, согласно [41], процесс медленного пиролиза является менее требовательным к содержанию влаги в биомассе (которое на примере древесины может достигать 15–20 %). Аналогичный вывод об оптимальном уровне влажности древесины перед проведением пиролизической переработки сделан в работе [42]. Таким образом, пиролиз биомассы может быть осуществлен для сырья без его предварительной сушки. При необходимости сушка сырья может быть организована за счет теплоты уходящих дымовых газов от сжигания пиролизного газа [43].

Кроме того, процесс пиролиза может быть организован в автотермическом режиме за счет теплоты разложения органической части сырья при оптимальном значении влажности [44], что позволит сократить затраты на сушку сырья.

Таблица 5. Оценка использования теплоты газообразных продуктов пиролиза вторичных ресурсов птицефабрики для покрытия энергозатрат предприятия

Table 5. Estimation of utilization of chicken litter pyrolysis gaseous products heat at poultry farm to cover the energy costs

Перерабатываемое сырье Processed raw materials	млн кВт·ч/год mln kWh per year		Доля покрытия энергозатрат птицефабрики, % Coverage share of poultry farm energy costs, %
	Энергозатраты птицефабрики Poultry farm energy costs	Теплосодержание газообразных продуктов пиролиза Heat content of gaseous pyrolysis products	
Помет+опилки 80/20 % (смесь) Litter+sawdust 80/20% (mixture)	13,0	8,7	66,9
Помет+опилки 80/20 % (слои) Litter+sawdust 80/20% (layers)		10,9	83,8
Нативный помет/Native litter		6,0	46,2

Дополнительная эффективность использования пиролизного газа для покрытия энергозатрат птицефабрики заключается в экономии условного топлива, которая может быть рассчитана по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ут}} = \frac{m_{\text{сп}} \cdot Q_{\text{газа}}}{Q_{\text{ут}}},$$

где $Q_{\text{газа}}$ = 1,91 МДж – теплосодержание газообразных продуктов пиролиза, выделяющихся при переработке 1 кг куриного помета; $Q_{\text{ут}}$ = 29,3 МДж/кг – теплота сгорания условного топлива.

На примере переработки нативного куриного помета (ежегодная выработка помета – 52,3 тыс. т) рассчитано, что суммарное теплосодержание газообразных продуктов пиролиза эквивалентно теплоте от сжигания 3412 т условного топлива в год. Данный факт способствует снижению зависимости птицефабрики от традиционных источников энергии и снижению экологической нагрузки за счет утилизации куриного помета. Дополнительная эффективность процесса достигается за счет того, что в результате пиролиза, помимо газообразных продуктов, из 1 т нативного куриного помета или смесевых композиций на основе куриного помета с

добавлением опилок можно получить 430–494 кг твердого углеродистого остатка. Твердые продукты находят применение, например, в качестве удобрения в сельском хозяйстве [45], при получении топлива и сорбентов – в энергетике и других отраслях промышленности [46, 47]. Жидкие продукты пиролиза содержат большое количество ценных компонентов, благодаря чему находят применение в химической, фармацевтической, строительной и других отраслях [48, 49].

Учитывая теплосодержание твердых и газообразных продуктов пиролиза, а также тепловые затраты, необходимые непосредственно для пиролитической переработки (относительно 1 кг исследуемого сырья), можно провести предварительную оценку коэффициента эффективности энергоресурсов (*Energy Return On Investment*) по формуле:

$$EROI = \frac{Q_i^r}{Q_{costs}/W},$$

где Q_i^r – теплота сгорания продуктов пиролиза исследуемого сырья, МДж/кг; Q_{costs} – тепловые затраты пиролиза, МДж/кг; W – количественная доля продуктов пиролиза (рис. 3, 5).

Полученные величины в зависимости от вида исследуемого сырья составляют от 2,2 (для нативного куриного помета) до 2,6 (для слоевой засыпки) для газообразных продуктов пиролиза; от 5,3 (для засыпки со смешиванием компонентов) до 7,2 (для слоевой засыпки) – для твердых продуктов. Суммарный коэффициент эффективности энергоресурсов для продуктов пиролиза варьируется в пределах 7,6–9,8.

Заключение

По результатам проведенных исследований установлено, что при пиролитической переработке нативного куриного помета выход газообразных продуктов составляет 21,4 %, а их теплосодержание – 1,91 МДж на 1 кг перерабатываемого сырья. Совместная пиролитическая переработка куриного помета с опилками позволит повысить эффективность

его использования с точки зрения энергетического потенциала образующихся газообразных продуктов. Выявлено, что создание композиций (в условиях предварительного смешивания компонентов и с использованием слоевой засыпки) на основе куриного помета (80 %) и опилок (20 %) приводит к положительному синергетическому эффекту – увеличивается выход пиролизного газа (29,7–31,3 %) и его теплосодержание (2,15–2,45 МДж/кг) относительно переработки нативного куриного помета. Значительная эффективность с точки зрения калорийности газообразных продуктов достигается при рассмотрении слоевой засыпки, применение которой целесообразно при использовании бесподстилочного куриного помета и позволит минимизировать затраты при изготовлении композиций. Использование же предварительного смешивания компонентов является имитацией пометно-подстилочной массы в случае напольного содержания кур.

Особое внимание в статье уделено оценке возможности использования потенциальной теплоты газообразных продуктов пиролиза для покрытия энергозатрат птицефабрики. Установлено, что ежегодное количество вырабатываемой теплоты от сжигания газообразных продуктов пиролитической переработки исследуемого сырья составит 6,0–10,9 млн кВт·ч, что позволит покрыть энергозатраты птицефабрики на 46–84 %. При этом доля покрытия энергозатрат возрастает в 1,5 и 1,8 раз при использовании засыпки с предварительным смешиванием компонентов и слоевой засыпки соответственно по сравнению с аналогичной величиной для газообразных продуктов пиролиза нативного куриного помета.

Таким образом, представленный в статье подход направлен на повышение эффективности использования вторичных ресурсов (суммарный коэффициент эффективности энергоресурсов для получаемых продуктов пиролиза варьируется в пределах 7,6–9,8) и снижение энергетических затрат птицеводства, что в конечном итоге способствует развитию более устойчивых агропромышленных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bioprocessing of waste biomass for sustainable product development and minimizing environmental impact / Z. Usmani, M. Sharma, A.K. Awasthi, N. Sivakumar, T. Lukk, L. Pecoraro, V.K. Thakur, D. Roberts, J. Newbold, V.K. Gupta // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 322. – P. 124548. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124548.
2. Methods for the conversion of biomass waste into value-added carbon nanomaterials: recent progress and applications / S.K. Tiwari, M. Bystrzejewski, A. de Adhikari, A. Huczko, N. Wang // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2022. – Vol. 92. – P. 101023. DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101023.
3. Sustainable poultry farming practices: a critical review of current strategies and future prospects / R.B. Bist, K. Bist, S. Poudel, D. Subedi, X. Yang, B. Paneru, S. Mani, D. Wang, L. Chai // *Poultry Science*. – 2024. – Vol. 103. – Iss. 12. – P. 104295. DOI: 10.1016/j.psj.2024.104295
4. Янь Л., Лемешевский В.О., Максимова С.Л. Влияние отходов крупных птицефабрик на состояние окружающей среды: обзор литературы // *Медицина труда и экология человека*. – 2024. – № 4. – С. 38–52. DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10403
5. Троянская М.А., Шахова А.А. Управление сферой природопользования и охраны окружающей среды: проблемы и направления решения // *Естественно-гуманитарные исследования*. – 2022. – № 41 (3). – С. 328–333.

6. Козырь Д.А. Аспекты термической утилизации органических отходов птицеводства // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 187–196. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4494
7. Состояние экосистем в условиях загрязнения окружающей среды предприятиями агропромышленного комплекса / Т.Ф. Тарасова, А.И. Байтелова, Н.С. Гурьянова, В.И. Байтелов // Вестник Оренбургского государственного аграрного университета. – 2015. – № 10. – С. 441–444. DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_207.
8. Возможности и ограничения развития птицеводства в регионах Дальнего Востока: экологические и экономические аспекты / Т.Б. Бардаханова, С.Н. Иванова, И.Г. Сангадиева, Е.Н. Ванчикова, Е.Ю. Итыгилова // Современная экономика: проблемы и решения. – 2024. – Т. 6. – С. 95–107. DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/6/95-107
9. Сизов Д.Ю., Шатохин В.И., Яицких В.Г. Универсальная установка по переработке отходов птицефабрик в органическое удобрение. URL: <https://himagregat-info.ru/science/tekhnika/universalnaya-ustanovka-po-pererabotke-otkhodov-ptitsefabrik-v-organicheskoe-udobrenie/> (дата обращения 22.01.2025).
10. Кондратьева Т.Д. Обоснование способа компостирования куриного помета для получения органического удобрения с использованием микробиологических добавок // Наука сегодня: факты, тенденции, прогнозы: материалы международной научно-практической конференции. – Вологда, 26 июня 2019. – Вологда: Изд-во «Маркер», 2019. – С. 11–13.
11. The problem of agricultural waste and ways to solve it / A.M. Agapkin, I.A. Makhotina, N.A. Ibragimova, O.B. Goryunova, A.K. Izembayeva, S.L. Kalachev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 981. – № 2. – P. 022009. DOI: 10.1088/1755-1315/981/2/022009.
12. Reducing the carbon footprint when using non-metallic minerals as litter in poultry farms / N. Sannikova, O. Kovaleva, O. Shulepova, A. Bocharova, V. Melnikov // Revista Ingeniería UC. – 2022. – Vol. 29. – № 1. – P. 43–50. DOI: 10.54139/revinguc.v29i1.154.
13. Васильев Э.В., Шалавина Е.В. Перспективы и экологические проблемы развития птицеводства в России // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства: теоретический и научно-практический журнал (ИАЭП). – 2017. – № 92. – С. 173–185.
14. Совфед одобрил закон о штрафах за неправильное обращение с навозом и пометом. URL: <https://rg.ru/2024/04/17/sovfed-odobril-zakon-o-shtrafah-za-nepravilnoe-obrashchenie-s-navozom-i-pometom.html> (дата обращения 22.01.2025).
15. Кулешова Л.А. Утилизация птичьего помета – насущная проблема промышленного птицеводства // Развитие агропромышленного комплекса на основе современных научных достижений и цифровых технологий: сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции. – СПб, Пушкин, 24–26 января 2019. – СПб: Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2019. – С. 213–217.
16. Тюменская область лидирует в УФО по производству молока, яиц, скота и птицы. URL: <https://t-l.ru/373756.html> (дата обращения 22.01.2025).
17. Вербицкий С. Утилизируем птичий помет с выгодой // Животноводство России. – 2019. – № 7. – С. 19–22. DOI: 10.25701/ZZR.2019.46.41.003.
18. Уханова В.Ю. Технологии Российского производства для птицеводства на примере автоматизированной системы управления ОВЕН // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2019. – № 2-1 (50). – С. 157–163.
19. Caliskan M., Tumen Ozdil N. F. Potential of biogas and electricity production from animal waste in Turkey // BioEnergy Research. – 2021. – Vol. 14. – № 3. – P. 860–869. DOI: 10.1007/s12155-020-10193-w.
20. A review on treatment processes of chicken manure / M.D. Manogaran, R. Shamsuddin, M.H. Mohd Yusoff, M. Lay, A.A. Siyal // Cleaner and Circular Bioeconomy. – 2022. – Vol. 2. – P. 100013. DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100013
21. Valorization of animal manure via pyrolysis for bioenergy: a review / G. Su, H.C. Ong, N.W. Mohd Zulkifli, S. Ibrahim, W.H. Chen, C.T. Chong, Y.S. Ok // Journal of Cleaner Production. – 2022. – Vol. 343. – P. 130965. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130965.
22. Пискава А.И. Анализ способов переработки сельскохозяйственных органических отходов на примере куриного помета // Экономика: экономика и сельское хозяйство. – 2016. – № 4 (12). – С. 1–8.
23. Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Рыбаков П.А. Проблемы утилизации помета при клеточном содержании в индустриальном птицеводстве // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 6. – С. 216–220.
24. Effects of turning frequency on ammonia emission during the composting of chicken manure and soybean straw / Q. Ma, Y. Li, J. Xue, D. Cheng, Z. Li // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – № 2. – P. 472 (1–21). DOI: 10.3390/molecules27020472
25. A global meta-analysis of greenhouse gas emissions and carbon and nitrogen losses during livestock manure composting: influencing factors and mitigation strategies / Y. Liu, R. Tang, L. Li, G. Zheng, J. Wang, G. Wang, Z. Bao, Z. Yin, G. Li, J. Yuan // Science of the Total Environment. – 2023. – Vol. 885. – P. 163900. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163900
26. Ivanov Y.G., Shafeev F.A., Belopukhov S.L. Use of the bedding manure of the poultry farms for the development of heat and complex fertilizers // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2017. – Vol. 2. – № 2. – P. 31–39.
27. Инновационные способы переработки биоотходов птицеводства / В.Н. Попов, О.С. Корнеева, О.Ю. Искусных, А.Ю. Искусных // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2020. – № 82 (1). – С. 194–200. DOI: 10.20914/2310-1202-2020-1-194-200.
28. Font-Palma C. Characterisation, kinetics and modelling of gasification of poultry manure and litter: an overview // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 53. – P. 92–98. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.08.017.
29. Thermal processing of blended fuels based on peat and dispersed wood to obtain useful energy products / A.D. Misyukova, S.A. Yankovsky, A.K. Berikbolov, N.S. Yankovskaya // Biomass Conversion and Biorefinery. – 2024. – P. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-024-06255-0.
30. Гигиенические требования к подстилочному материалу, используемому при выращивании птицы: рекомендации / Д.В. Медведева, В.А. Медведский, А.П. Косяк, Т.В. Медведская. – Витебск: ВГАВМ, 2020. – 23 с.

31. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 258 с.
32. Новиков М.Н., Хохлов В.И., Рябков В.В. Птичий помет – ценное органическое удобрение. – М.: РОСАГРОПРОМИЗДАТ, 1989. – 80 с.
33. Агрохимия / В.Г. Минеев, В.Г. Сычев, Г.П. Гамзиков и др. / под ред. В.Г. Минеева. – М.: Изд-во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. – 854 с.
34. Исследование кинетики термического разложения древесной подстилочной массы / А.З. Халитов, А.Н. Грачев, А.А. Макаров, В.Н. Башкиров, М.А. Варфоломеев, М.И. Валитов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 14. – С. 108–110.
35. Comparative analysis of conventional and microwave pyrolysis of raw materials with different degree of metamorphism / K. Ibraeva, A. Astafev, I. Dimitryuk, R. Tabakaev, I. Kalinich, I. Shanenkov // Energy Conversion and Management. – 2024. – Т. 301. – P. 118067. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118067.
36. Разгильдеев Г.И., Храмцов Р.А. Анализ электропотребления на животноводческих комплексах и птицефабриках Кемеровской области // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2005. – № 2. – С. 47–50.
37. Пекарь В.В., Пономарева Е.А. Состояние отрасли птицеводства в условиях ЗАО птицефабрика «Пышминская» Тюменского района // Актуальные вопросы науки и хозяйства: новые вызовы и решения: сборник материалов LI Международной студенческой научно-практической конференции. – Тюмень, 16 марта 2017. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2017. – С. 206–208.
38. Мустафина Г.Р., Кондратьев А.Е. Перспективы применения биогазовой установки при утилизации органических отходов птицефабрик // Экологическая безопасность в техносферном пространстве: сборник материалов Третьей Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых ученых и студентов. – Екатеринбург, 9 июня 2020. – Екатеринбург: Российский государственный профессионально-педагогический университет, 2020. – С. 88–90.
39. Технология и технические средства стерилизации птичьего помета и производства комплексного органического удобрения / Н.М. Орынбаев, С.А. Нургожаев, М.К. Алдабергенов, О.Е. Сейпаталиев, М. Янков // Izdenister natigeler. – 2024. – № 3 (103). – С. 479–490. DOI: 10.37884/3-2024/51
40. Fantozzi F., D'Alessandro B., Desideri U. Integrated Pyrolysis Regenerated Plant (IPRP): an efficient and scalable concept for gas turbine based energy conversion from biomass and waste // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2005. – Vol. 127. – № 2. – P. 348–357. DOI: 10.1115/1.1789513.
41. Uddin M.N., Daud W.M.A.W., Abbas H.F. Effects of pyrolysis parameters on hydrogen formations from biomass: a review // RSC Advances. – 2014. – Vol. 4. – № 21. – P. 10467–10490. DOI: 10.1039/c3ra43972k.
42. Крылова А.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А.В. Получение биоугля пиролизом биомассы // Химия твердого топлива. – 2019. – № 6. – С. 55–64. DOI: 10.1134/S0023117719060100.
43. Simulation and analysis of poultry litter drying process using residual heat from combustion system / S.O. Alamu, X. Qian, S.W. Lee, Y. Yang, D. An // Proceedings of the 9th Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering. – 2020 SISE Virtual Conference, September 17–18, 2020. – P. 22–28.
44. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects / R.B. Tabakaev, A.V. Astafev, Y.V. Dubinin, N.A. Yazykov, A.S. Zavorin, V.A. Yakovlev // Journal of thermal analysis and calorimetry. – 2018. – Vol. 134. – P. 1045–1057. DOI: 10.1007/s10973-018-7562-7.
45. Prospect of chicken litter as a source of sustainable energy / M.H. Masud, A.A. Ananno, M. Mahjabeen, N. Ahmed, P. Dabnichki // Manure Technology and Sustainable Development. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – P. 107–144.
46. The production of bio-based fuels and carbon catalysts from chicken waste / A.M. Daabo, L.I. Saeed, M.H. Altamer, A.B. Fadhil, T. Badawy // Renewable Energy. – 2022. – Vol. 201. – P. 21–34. DOI: 10.1016/j.renene.2022.10.088.
47. Poultry litter as biomass energy: a review and future perspectives / F.S. Dalólio, J.N. da Silva, A.C.C. de Oliveira, I.F.F. Tinôco, R.C. Barbosa, M.O. Resende, L.F.T. Albino, S.T. Coelho // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 76. – P. 941–949. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.104.
48. Chicken litter: a waste or a source of chemicals? Fast pyrolysis and hydrothermal conversion as alternatives in the valorisation of poultry waste / E.M. Pachón Gómez, R.E. Domínguez, D.A. López, J.F. Téllez, M.D. Marino, N. Almada, J.M. Gange, E.L. Moyano // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – Vol. 169. – P. 105796. DOI: doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105796.
49. Ex-situ catalytic pyrolysis of chicken litter for bio-oil production: experiment and characterization / S. Izzah, S.A.B. Muhammad, S.R. Md, K.A. Abul // Journal of Environmental Management. – 2021. – Vol. 297. – P. 113407. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113407.

Информация об авторах

Александр Владимирович Астафьев, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. a.v.astafev@utmn.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5490-4043>

Игорь Дмитриевич Димитрюк, инженер-исследователь лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. i.d.dimitryuk@utmn.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4820-7874>

Мария Андреевна Гайдабрус, младший научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы, аспирант кафедры Прикладной и технической физики Школы естественных наук Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. m.agajdabrus@utmn.ru. <http://orcid.org/0009-0005-8569-5327>

Канипа Талгатовна Ибраева, кандидат технических наук, заведующий лабораторией ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. k.ibraeva@utmn.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5274-8294>

Поступила в редакцию: 17.02.2025

Поступила после рецензирования: 08.04.2025

Принята к публикации: 04.06.2025

REFERENCES

1. Usmani Z., Sharma M., Awasthi A.K., Sivakumar N., Lukk T., Pecoraro L., Thakur V.K., Roberts D., Newbold J., Gupta V.K. Bioprocessing of waste biomass for sustainable product development and minimizing environmental impact. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 322, pp. 124548. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124548.
2. Tiwari S.K., Bystrzejewski M., De Adhikari A., Huczko A., Wang N. Methods for the conversion of biomass waste into value-added carbon nanomaterials: recent progress and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, vol. 92, pp. 101023. DOI: 10.1016/j.pecs.2022.101023.
3. Bist R.B., Bist K., Poudel S., Subedi D., Yang X., Paneru B., Mani S., Wang D., Chai L. Sustainable poultry farming practices: a critical review of current strategies and future prospects. *Poultry Science*, 2024, vol. 103, Iss. 12, pp. 104295. DOI: 10.1016/j.psj.2024.104295.
4. Yan Li, Lemeshevsky V.O., Maksimova S.L. Impact of waste from large poultry farms on the environment (review of foreign literature). *Occupational medicine and human ecology*, 2024, no. 4, pp. 38–52. (In Russ.) DOI: 10.24412/2411-3794-2024-10403.
5. Trojanskaya M.A., Shakhova A.A. Environmental management and environmental protection: problems and solutions. *Natural-Humanitarian Studies*, 2022, no. 41 (3), pp. 328–333. (In Russ.)
6. Kozyr D.A. Aspects of thermal utilization of organic poultry waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 187–196. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4494.
7. Tarasova T.F., Baitelova A.I., Guryanova N.S., Baitelov V.I. State of ecosystems in conditions of environmental pollution by enterprises of agroindustrial complex. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2015, no. 10, pp. 441–444. (In Russ.) DOI: 10.48136/2222-0364_2022_4_207.
8. Bardakhanova T.B., Ivanova S.N., Sangadieva I.G., Vanchikova E.N., Itygilova E.Yu. Opportunities and limitations of poultry farming development in the regions of the far east: environmental and economic aspects. *Modern Economics: Problems and Solutions*, 2024, vol. 6, pp. 95–107. (In Russ.) DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/6/95-107.
9. Sizov D.Yu., Shatokhin V.I., Yaitskikh V.G. *Universal installation for processing poultry farm waste into organic fertilizer*. (In Russ.) Available at: <https://himagregat-info.ru/science/tekhnika/universalnaya-ustanovka-po-pererabotke-otkhodov-pitsefabrik-v-organicheskoe-udobrenie/> (accessed 22 January 2025).
10. Kondratieva T.D. Justification of the method of composting chicken manure to obtain organic fertilizer with the use of microbiological additives. *Science today: facts, trends, forecasts. Materials of the international scientific-practical conference*. Vologda, June 26, 2019. Vologda, Marker LLC Publ., 2019. pp. 11–13. (In Russ.)
11. Agapkin A.M., Makhotina I.A., Ibragimova N.A., Goryunova O.B., Izembayeva A.K., Kalachev S.L. The problem of agricultural waste and ways to solve it. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, vol. 981, no. 2, pp. 022009. DOI: 10.1088/1755-1315/981/2/022009.
12. Sannikova N., Kovaleva O., Shulepova O., Bocharova A., Melnikov V. Reducing the carbon footprint when using non-metallic minerals as litter in poultry farms. *Revista Ingeniería UC*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 43–50. DOI: 10.54139/revinguc.v29i1.154.
13. Vasilev E.V., Shalavina E.V. Opportunities and environmental challenges for development of poultry farming in Russia. *Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock production: theoretical and scientific-practical journal*, 2017, no. 92, pp. 173–185. (In Russ.)
14. Sovfed approved the law on fines for improper handling of manure and litter. (In Russ.) Available at: <https://rg.ru/2024/04/17/sovfed-odobril-zakon-o-shtrafah-za-nepravilnoe-obrashchenie-s-navozom-i-pometom.html> (accessed 22 January 2025).
15. Kuleshova L.A. Poultry manure utilization is an urgent problem for industrial poultry production. *Development of agro-industrial complex on the basis of modern scientific achievements and digital technologies. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific-practical conference*. St Petersburg, Pushkin, January 24–26, 2019. St Petersburg, St Petersburg State Agrarian University Publ., 2019. pp. 213–217 (In Russ.)
16. *Tyumen Region leads the UFD in milk, eggs, livestock and poultry production*. (In Russ.) Available at: <https://t-l.ru/373756.html> (accessed 22 January 2025).
17. Verbitsky S. Recycling poultry droppings with profit. *Livestock breeding in Russia*, 2019, no. 7, pp. 19–22. (In Russ.) DOI: 10.25701/ZZR.2019.46.41.003.
18. Ukhanova V.Yu. Technologies of Russian production for poultry on the example of an automated control system OWEN. *Proceedings of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov*, 2019, no. 2-1 (50), pp. 157–163 (In Russ.)

19. Caliskan M., Tumen Ozdil N. F. Potential of biogas and electricity production from animal waste in Turkey. *BioEnergy Research*, 2021, vol. 14, no. 3, pp. 860–869. DOI: 10.1007/s12155-020-10193-w.
20. Manogaran M.D., Shamsuddin R., Mohd Yusoff M.H., Lay M., Siyal A.A. A review on treatment processes of chicken manure. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 2022, vol. 2, pp. 100013. DOI: 10.1016/j.clcb.2022.100013.
21. Su G., Ong H.C., Mohd Zulkifli N.W., Ibrahim S., Chen W.H., Chong C.T., Ok Y.S. Valorization of animal manure via pyrolysis for bioenergy: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 343, pp. 130965. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130965.
22. Piskaeva A.I. Analysis of the methods of processing of agricultural organic wastes on the example of chicken manure. *AEconomics: economics and agriculture*, 2016, no. 4 (12), pp. 1–8. (In Russ.)
23. Sidyganov Yu.N., Onuchin E.M., Rybakov P.A. Problems of utilization of little in cellular content in industrial poultry poisoning. *Innovation and investment*, 2018, no. 6, pp. 216–220 (In Russ.)
24. Ma Q., Li Y., Xue J., Cheng D., Li Z. Effects of turning frequency on ammonia emission during the composting of chicken manure and soybean straw. *Molecules*, 2022, vol. 27, no. 2, pp. 472 (1–21). DOI: 10.3390/molecules27020472.
25. Liu Y., Tang R., Li L., Zheng G., Wang J., Wang G., Bao Z., Yin Z., Li G., Yuan. J. A global meta-analysis of greenhouse gas emissions and carbon and nitrogen losses during livestock manure composting: influencing factors and mitigation strategies. *Science of the Total Environment*, 2023, vol. 885, pp. 163900. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163900.
26. Ivanov Y.G., Shafeev A.F., Belopukhov S.L. Use of the bedding manure of the poultry farms for the development of heat and complex fertilizers. *British Journal of Innovation in Science and Technology*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 31–39.
27. Popov V.N., Korneeva O.S., Iskusnykh O.Yu., Iskusnykh A.Yu. Innovative ways to process poultry waste. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2020, no. 82 (1), pp. 194–200. (In Russ.) DOI:10.20914/2310-1202-2020-1-194-200.
28. Font-Palma C. Characterisation, kinetics and modelling of gasification of poultry manure and litter: An overview. *Energy Conversion and Management*, 2012, vol. 53, pp. 92–98. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.08.017.
29. Misukova A.D., Yankovsky S.A., Berikbolov A.K., Yankovskaya N.S. Thermal processing of blended fuels based on peat and dispersed wood to obtain useful energy products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s13399-024-06255-0.
30. Medvedeva D.V., Medvedsky V.A., Kosyak A.P., Medvedskaya T.V. *Hygienic requirements for bedding material used in poultry rearing: recommendations*. Vitebsk, Vitebsk State Academy of Veterinary Medicine, Department of Animal Hygiene Publ., 2020. 23 p. (In Russ.)
31. *Thermal calculation of boilers (normative method)*. 3rd ed. St. Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 258 p. (In Russ.)
32. Novikov M.N., Khokhlov V.I., Ryabkov V.V. *Poultry manure is a valuable organic fertilizer*. Moscow, ROSAGROPROMIZDAT Publ., 1989. 80 p. (In Russ.)
33. Mineev V.G., Sychev V.G., Gamzikov G.P. *Agrochemistry*. Moscow, D.N. Pryanishnikov VNIIA Publ., 2017. 854 p. (In Russ.)
34. Khalitov A.Z., Grachev A.N., Makarov A.A., Bashkirov V.N., Varfolomeev M.A., Valitov M.I. Study of the kinetics of thermal decomposition of wood litter mass. *Herald of technological university*, 2013, vol. 16, no. 14, pp. 108–110. (In Russ.)
35. Ibraeva K., Astafev A., Dimitryuk I., Tabakaev R., Kalinich I., Shanenkov I. Comparative analysis of conventional and microwave pyrolysis of raw materials with different degree of metamorphism. *Energy Conversion and Management*, 2024, vol. 301, pp. 118067. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118067.
36. Razgildeev G.I., Khramtsov R.A. Analysis of power consumption at livestock complexes and poultry farms of the Kemerovo region. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*, 2005, no. 2, pp. 47–50. (In Russ.)
37. Pekar V.V., Ponomareva E.A. The state of the poultry industry in the conditions of Poultry Farm «Pyshminskaya», Tyumen district. *Actual issues of science and economy: new challenges and solutions. Collection of materials of LI International Student Scientific and Practical Conference*. Tyumen, March 16, 2017. Tyumen, State Agrarian University of Northern Trans-Urals Publ., 2017. pp. 206–208. (In Russ.)
38. Mustafina G.R., Kondratyev A.E. Prospects of application of biogas plant in utilization of organic wastes of poultry farms. *Ecological safety in technosphere space. Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference of teachers, young scientists and students*. Ekaterinburg, June 9, 2020. Yekaterinburg, Russian State Professional and Pedagogical University Publ., 2020. pp. 88–90. (In Russ.)
39. Orynbaev N.M., Nurgozhaev S.A., Aldabergenov M.K., Seipataliev O.E., Yankov M. Technology and technical means of sterilization of poultry manure and production of complex organic fertilizer. *Izdenister natigeler*, 2024, no. 3 (103), pp. 479–490. (In Russ.) DOI: 10.37884/3-2024/51.
40. Fantozzi F., D'Alessandro B., Desideri U. Integrated Pyrolysis Regenerated Plant (IPRP): An efficient and scalable concept for gas turbine based energy conversion from biomass and waste. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2005, vol. 127, no. 2, pp. 348–357. DOI: 10.1115/1.1789513.
41. Uddin M.N., Daud W.M.A.W., Abbas H.F. Effects of pyrolysis parameters on hydrogen formations from biomass: a review. *RSC Advances*, 2014, vol. 4, no. 21, pp. 10467–10490. DOI: 10.1039/c3ra43972k.
42. Krylova A.Yu., Gorlov E.G., Shumovskij A.V. Production of biochar by pyrolysis of biomass. *Solid Fuel Chemistry*, 2019, no. 6, pp. 55–64. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0023117719060100.
43. Alamu S.O., Qian X., Lee S.W., Yang Y., An D. Simulation and analysis of poultry litter drying process using residual heat from combustion system. *Proceedings of the 9th Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*. 2020 SISE Virtual Conference, September 17–18, 2020. pp. 22–28.
44. Tabakaev R.B., Astafev A.V., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Zavorin A.S., Yakovlev V.A. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 2018, vol. 134, pp. 1045–1057. DOI: 10.1007/s10973-018-7562-7.
45. Masud M.H., Ananno A.A., Mahjabeen M., Ahmed N., Dabnichki P. *Prospect of chicken litter as a source of sustainable energy. Manure Technology and Sustainable Development*. Singapore, Springer Nature Singapore, 2023. pp. 107–144.

46. Daabo A.M., Saeed L.I., Altamer M.H., Fadhil A.B., Badawy T. The production of bio-based fuels and carbon catalysts from chicken waste. *Renewable Energy*, 2022, vol. 201, pp. 21–34. DOI: 10.1016/j.renene.2022.10.088.
47. Dalólio F.S., Da Silva J.N., De Oliveira A.C.C., Tinoco I.F.F., Barbosa R.C., Resende M.O., Albino L.F.T., Coelho S.T. Poultry litter as biomass energy: A review and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 76, pp. 941–949. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.104.
48. Pachón Gómez E.M., Domínguez R.E., López D.A., Téllez J.F., Marino M.D., Almada N., Gange J.M., Moyano E.L. Chicken litter: a waste or a source of chemicals? Fast pyrolysis and hydrothermal conversion as alternatives in the valorisation of poultry waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, vol. 169, pp. 105796. DOI: doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105796.
49. Izzah S., Muhammad S.A.B., Md S.R., Abul K.A. Ex-situ catalytic pyrolysis of chicken litter for bio-oil production: experiment and characterization. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 297, pp. 113407. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113407.

Information about the authors

Alexander V. Astafev, Cand. Sc., Researcher, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. a.v.astafev@utmn.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5490-4043>

Igor D. Dimitryuk, Research Engineer, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. i.d.dimitryuk@utmn.ru. <http://orcid.org/0000-0002-4820-7874>

Maria A. Gajdabrus, Junior Researcher, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. m.a.gajdabrus@utmn.ru. <http://orcid.org/0009-0005-8569-5327>

Kanipa T. Ibraeva, Cand. Sc., Head of Laboratory, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. k.ibraeva@utmn.ru. <http://orcid.org/0000-0002-5274-8294>

Received: 17.02.2025

Revised: 08.04.2025

Accepted: 04.06.2025