

Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 1 (49). С. 58–68  
Vestnik Kurganskoj GSXA. 2024; (1-49): 58–68

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья  
УДК 62-66:631.95  
Код ВАК 4.3.1

EDN: YMYHZC

ТЕХНОЛОГИЯ УТИЛИЗАЦИИ МНОГОТОННАЖНЫХ ОТХОДОВ  
ПТИЦЕВОДЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Булат Гусманович Зиганшин<sup>1✉</sup>, Наиль Насихович Фахреев<sup>2</sup>,  
Ильнур Хамзович Гайфуллин<sup>3</sup>, Борис Литта Иванов<sup>4</sup>, Артем Вячеславович Шорников<sup>5</sup>  
<sup>1, 3, 4, 5</sup> Казанский государственный аграрный университет, Казань, Россия  
<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия  
<sup>1</sup> zigan66@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8250-9403>  
<sup>2</sup> fakhreevnn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0975-1682>  
<sup>3</sup> ilnur.gai@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9786-5227>  
<sup>4</sup> littab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9080-5520>  
<sup>5</sup> artemshornikov1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4558-8214>

**Аннотация.** Целью исследований является выявление недостатков технологической схемы термической утилизации отходов птицеводства и расширение возможностей использования энергетического потенциала топливного газа и его эксергетической составляющей. Технологическая линия утилизации отходов птицеводства подвергается декомпозиции методом построения графов. Уравнения балансов (материальных и энергетических) как инструмент научных исследований использовались для определения источников низкопотенциальной энергии. Проанализировав открытые источники, выявили крупные центры образования отходов, тем самым обозначив их как центры внедрения наилучших инженерных решений по утилизации отходов, т. е. в данных районах предлагается размещение установок по термической утилизации помета птицы с получением топливного газа. Данные центры реализуют кустовой метод сбора и утилизации отходов. Проведя декомпозицию технологической схемы газификационной установки, выявили пути повышения энергетической эффективности, а именно использование части топливного газа на собственные нужды, а также отбор низкопотенциального тепла с помощью тепловых насосов для предварительного подсушивания исходного сырья. Определенный состав золы, достигающий 10–20 % от общей массы сырья, пригоден в качестве минерального удобрения. Решением транспортной задачи получены оптимальные логистические маршруты для доставки данного продукта до потребителей в границах региона. Выявленный избыток возможен к реализации на внешнем рынке минеральных удобрений. Газификационные установки позволяют снизить объем отхода до 80–90 % в зависимости от исходной влажности. При анализе внутренних связей в газификационной установке выявлены потенциальные возможности оптимизации по приходной части баланса, а именно по расходу энергоресурсов на собственные нужды. В частности, использование части топливного газа на подогрев установки и выработку пара, а также использование низкопотенциального тепла конденсата в тепловых насосах. В дополнение получаемая зола, в составе которой преобладают фосфор и калий, пригодна для внесения на сельскохозяйственные поля.

**Ключевые слова:** птицеводство, отходы, утилизация, топливный газ.

**Для цитирования:** Зиганшин Б.Г., Фахреев Н.Н., Гайфуллин И.Х., Иванов Б.Л., Шорников А.В. Технология утилизации многотоннажных отходов птицеводческой отрасли // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 1 (49). С. 58–68. EDN: YMYHZC.

## Scientific article

TECHNOLOGY OF HEAVY-TONNAGE WASTE RECYCLING OF IN THE POULTRY  
INDUSTRY

Bulat G. Ziganshin<sup>1✉</sup>, Nail N. Fakhreev<sup>2</sup>, Ilnur Kh. Gaifullin<sup>3</sup>, Boris L. Ivanov<sup>4</sup>, Artem V. Shornikov<sup>5</sup>  
<sup>1, 3, 4, 5</sup> Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia  
<sup>2</sup> Kazan State Energy University, Kazan, Russia  
<sup>1</sup> zigan66@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8250-9403>  
<sup>2</sup> fakhreevnn@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0975-1682>  
<sup>3</sup> ilnur.gai@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9786-5227>  
<sup>4</sup> littab@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9080-5520>  
<sup>5</sup> artemshornikov1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-4558-8214>

**Abstract.** The purpose of the research is to identify the shortcomings of the technological scheme of thermal disposal of poultry waste and to expand the possibilities of using the energy potential of power gas and its exergetic component. The technological line for poultry waste disposal is decomposed using the graph construction method. The equations of balances (material and energy), as a tool of scientific research, were used to determine the sources of low-potential energy. After analyzing the open sources, large waste production centers were identified, thereby designating them as the centers for implementing the best engineering solutions for waste disposal, i.e. in these areas it is proposed to place the equipment for poultry manure thermal disposal to produce power gas. These centers implement a clustering technique of waste collection and disposal. Having carried out the decomposition of the gasification plant technological scheme, the ways to increase energy efficiency were identified, namely, partial application of the power gas for in-house needs, as well as the selection of low-potential heat using heat pumps for pre-drying of the feedstock. A certain ash composition, reaching 10-20% of the total weight of the raw material, is suitable as a mineral fertilizer. By solving the transport problem, optimal logistics routes have been obtained to deliver this product to consumers within the borders of the region. The identified excess is possible for sale on the foreign market of mineral fertilizers. Gasification plants can reduce the volume of waste up to 80-90%, depending on the initial humidity. When analyzing the internal relations in the gasification plant, potential optimization possibilities for the incoming part of the balance, namely, the consumption of energy resources for in-house needs, were identified. In particular, partial application of the power gas for heating the unit and generating steam, as well as using low-potential condensate heat in heat pumps. In addition, the resulting ash, which is dominated with phosphorus and potassium, is suitable for using it at agricultural fields.

**Keywords:** poultry farming, waste, recycling, power gas.

**For citation:** Ziganshin B.G., Fakhreev N.N., Gaifullin I.Kh., Ivanov B.L., Shornikov A.V. Technology of heavy-tonnage waste recycling of in the poultry industry. Vestnik Kurganskoj GSHA. 2024; (1–49): 58–68. EDN: YMYHZC. (In Russ).

**Введение.** В связи с динамичным развитием отечественного агропромышленного комплекса увеличивается объём отходов, что подтверждает необходимость акцентировать внимание на научно-технические достижения в их переработке для птицеводческой отрасли [1].

К отходам птицеводства относятся отходы жизнедеятельности сельскохозяйственной птицы, а именно помет. Помет на птицеводческих предприятиях образуется бесподстилочный (при выращивании птицы в клетках) и подстилочный (при выращивании напольно).

Научному обществу необходимо предложить и обосновать такие перспективные инженерные решения по утилизации отходов, которые содействовали бы сельхозпредприятиям в реализации основных целей Указа Президента Российской Федерации от 21.07.2016 г. «О мерах по реализации государственной научно-технической политики в интересах развития сельского хозяйства» и основных задач Постановления Правительства от 25.07.2017 г. «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017-2030 годы», в частности разработки и оптимизации технологий переработки отходов производства, а также разработки и оптимизации технологий энерго- и ресурсосбережения.

Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи: 1) установить актуальность внедрения в технологическую схему утилизации отходов птицеводства газификационной установки; 2) выявить внутренние связи между технологическими устройствами газификационной установки методом графов; 3) представить варианты усовершенствования технологической схемы газификационной установки, учитывающие исходящие связи и эксергетические показатели получаемого продукта; 4) дополнить технологический регламент переработки отходов путем реализации золы в качестве минерального удобрения на сельскохозяйственные поля.

Технологии утилизации отходов термическим способом (газификационные установки) решают проблему рационального природопользования в регионах с учётом энергетических аспектов использования отходов птицеводства в качестве альтернативного топлива с одновременной ликвидацией помётохранилищ [1].

Итоги сельскохозяйственной переписи дают понимание о количественной характеристике предприятий по хозяйствам всех категорий, например, в Приволжском федеральном округе (ПФО) (рисунок 1), являющихся потенциальными объектами внедрения перспективных инженерных решений [2].

Проанализировав карту региона, приходим к выводу, что крупные птицеводческие предприятия практически равноудалены друг от друга.

Обратив внимание на основные положения социально-экономического развития региона приходим к заключению, что Лаишевский, Тукаевский и Лениногорский муниципальные районы Республики Татарстан, в которых располагаются крупные птицеводческие предприятия, совпадают с крупными центрами развития. При этом сбор отходов от малых предприятий предполагается кустовым методом ввиду того, что внедрение наилучших инженерных решений требует финансовых вложений, дополнительных трудозатрат по согласованию с надзорными органами и достаточного количества сырья для бесперебойной работы внедряемых установок.

Дополнительным аргументом для обоснования внедрения технологий утилизации являются экологические платежи.

Для пояснения зададимся типовым предприятием по разведению птицы поголовьем 5000 голов. В первую очередь необходимо задаться структурой образования подстилочно-пометной массы (таблица 1).

Типовое птицеводческое предприятие состоит из двух блоков: выращивание молодняка и содержание взрослой птицы.

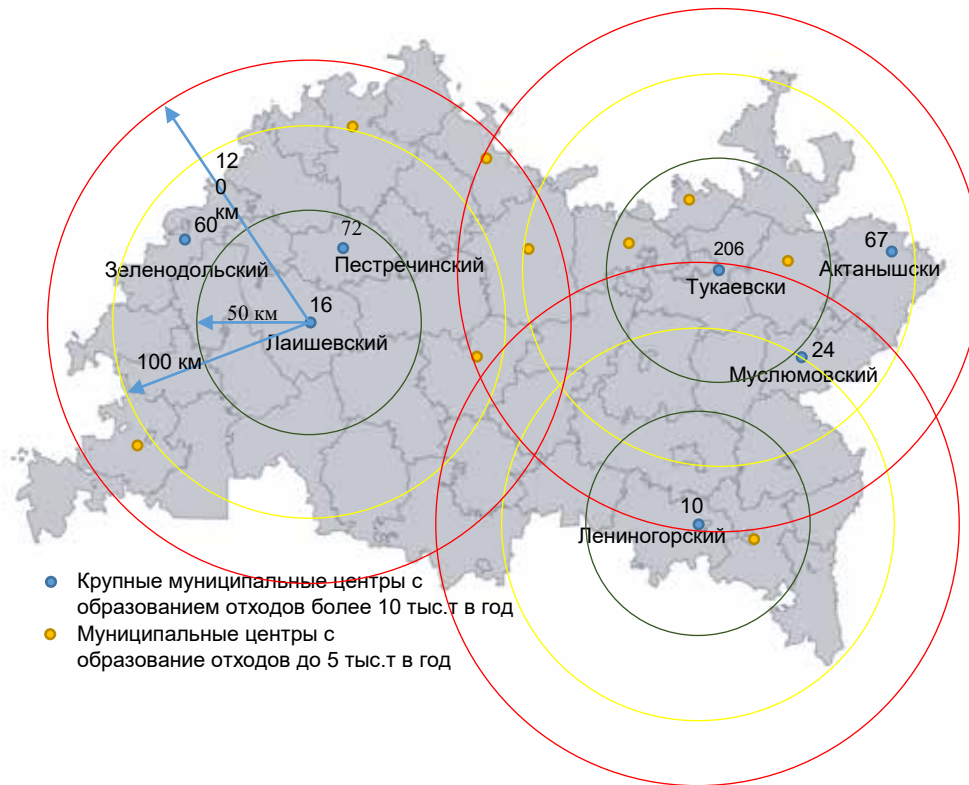


Рисунок 1 – Карта расположения птицеводческих предприятий с обозначением количества образования отходов (помета птицы)

Таблица 1 – Количество образующейся подстильно-помётной массы (ППМ)

Блок 1	Блок 2
Помёт, т/год	
706,86	126,72
Подстилка, т/год	
200	18
Количество образующегося ППМ из птицефабрики – 1 051,58 т/год	
Усушка помёта составляет 20 %	
Количество утилизируемой ППМ – 841,264 т/год	

С момента удаления птицы из птичника по достижении 237-дневного возраста и отправки на убой в птичнике остаётся 841 т помета за цикл [3].

Весь помет реализовать в качестве удобрения не представляется возможным ввиду отсутствия на балансе предприятия сельскохозяйственных угодий. По данному сценарию на предприятие, согласно Федеральному закону «Об отходах производства и потребления» от 24.06.1998 № 89-ФЗ, накладываются экологические платежи за размещение отходов.

При этом платеж предприятия рассчитывается по формуле:

$$P = M \times C \times k \quad (1)$$

где  $M$  – масса образующихся отходов (т),

$C$  – ставка платы (руб./т),  $k$  – дополнительный коэффициент для расчета платы за негативное воздействие на окружающую среду.

Дополнительный коэффициент для расчета платы за негативное воздействие на окружающую среду устанавливается ежегодно Постановлением Правительства РФ от 20.03.2023 № 437 «О применении в 2023 году ставок платы за негативное воздействие на окружающую среду». На сегодняшний день действует коэффициент к ставке платы в размере 1,26.

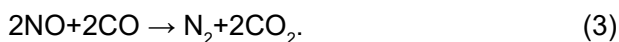
Помёт птицы относится в 3 классу опасности. Платежная база составляет 1327 руб./т, и с учетом дополнительного коэффициента 1,26 на 2023 год плата предприятия составит 1406 тыс. рублей в год. К внедрению принимается технология газификации.

фикации с получением топливного газа, в составе которого преобладает монооксид углерода и водород. Топливный газ в сравнении с метаном обладает большей теплотворной способностью, которая достигает 11000 кДж/кг [4–5]. Технология газификации является наиболее предпочтительной как с экологической, так и с энергетической точки зрения.

На уравнениях химических реакций можно обосновать перспективность технологии газификации. При водяной конверсии благодаря паровой газификации происходит следующая реакция:



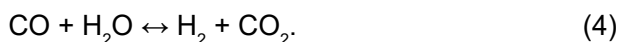
При паровой газификации наблюдается снижение концентрации такого вредного для окружающей среды соединения, как оксид азота (NO). Следующая реакция разложения монооксида азота на атомарный азот обосновывает экологичность предлагаемой газификационной установки [6]:



При этом наблюдается повышение концентрации горючих компонентов в синтез-газе. Так, при снижении коэффициента избытка воздуха до нулевых значений, теоретическая теплотворная способность достигает 11000 кДж/кг.

Расчётные значения теплотворной способности синтез-газа, полученные из биомассы при воздушной газификации, были значительно ниже, чем теплотворная способность синтез-газа, получаемая без подачи воздуха и с внешней подачей тепловой энергии. Это, прежде всего, из-за наличия негорючих веществ, в основном азота (N<sub>2</sub>) и в меньшей степени воды (H<sub>2</sub>O) и углекислого газа (CO<sub>2</sub>).

При этом CO<sub>2</sub> вступает в реакцию:



Как правило, оксид углерода (CO), водород (H<sub>2</sub>), углекислый газ (CO<sub>2</sub>), азот (N<sub>2</sub>), вода (H<sub>2</sub>O) и метан (CH<sub>4</sub>) считаются продуктами газификации. Все представленные составляющие синтез-газа образуются при термической деструкции органических отходов птицеводства (помёта) и участвуют в химических реакциях.

Полученные результаты позволили разработать и сконструировать новую газификационную установку (рисунок 2), работающую по принципу кипящего слоя. Интенсификатором газификации является водяной пар [7].

Технология газификации твердых топлива и отходов рассматривается многими авторами [8–10]. Газификационные установки различаются по виду газифицирующего агента, конструктивным особенностям и источнику теплового воздействия [11; 12]. Подробные исследования и математические модели таких авторов, как Д. Силва [12]

и П. Каушал [13], применяют балансовые уравнения энергии и массы. Из этих уравнений можно получить адекватные модели параметров, которые служат для характеристики процесса газификации в установке. Знание этих параметров делает проект оборудования технически жизнеспособным для промышленного масштаба.



- 1 – термopара; 2 – мультиметр; 3 – выходной штуцер; 4 – пробоотборное отверстие; 5 – загрузочный люк; 6 – корпус парового газогенератора; 7 – парогенератор; 8 – манометр-конденсатор; 9 – регулятор нагревателя

Рисунок 2 – Газификационная установка

В работе М. Вази и др. [14] разработана численная модель для моделирования процессов газификации биомассы. Подход, основанный на равновесии константы, является преимуществом при моделировании уравнений термодинамики.

ческого равновесия. Сочетание законов сохранения энергии в открытой системе сохранения атомных видов и законов химического равновесия обеспечивают численный алгоритм, который может быть использован для прогнозирования состава синтез-газа и исследования влияния важных переменных на характеристики газификации.

Особо отмечается работа ученых А. Рамос и др. [15], в которой обобщены многолетние работы авторов по методам математического моделирования процессов газификации отходов различного происхождения и определены главные свойства надёжной математической модели:

- обеспечение набора оптимальных условий эксплуатации;
- обозначение системных опасностей и ограничений;
- предсказывание результатов экспериментов по газификации и результаты для набора переменных для эксплуатации, включая различные виды сырья;
- объяснение результатов эксперимента;
- использование для экспериментов с масштабированием.

В работах ученых модели описывают режимы работы при различных исходных данных и позволяют подобрать конструктивные особенности в каждом случае применения технологии газифи-

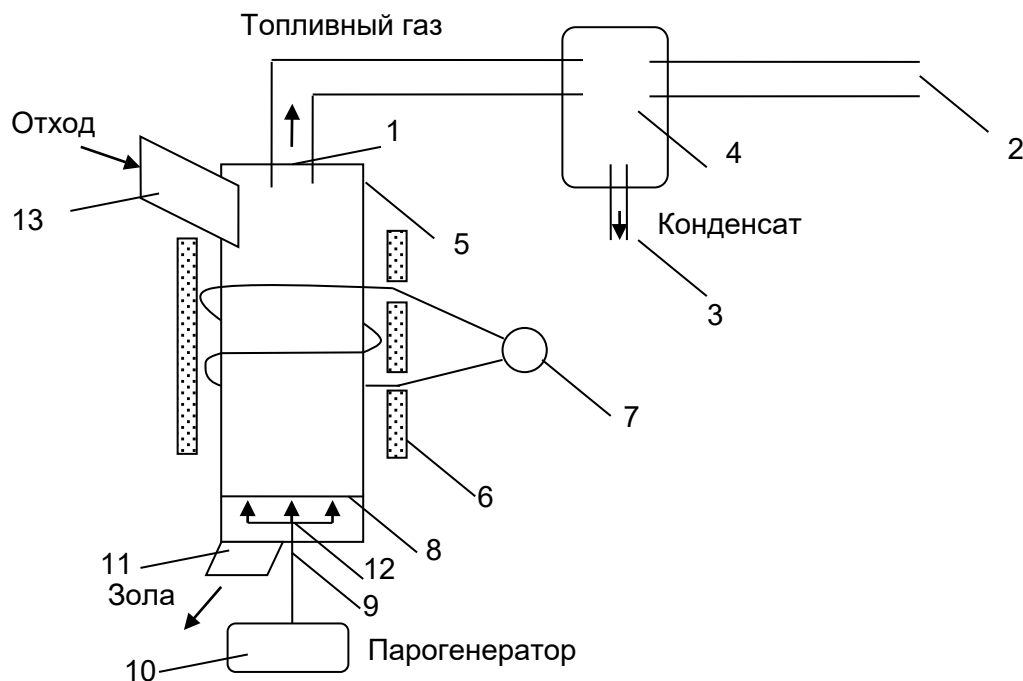
кации, но расчеты проводятся для достижения целей получения топливного газа.

Разработанная газификационная установка работает по следующему принципу (рисунок 3). Корпус 1, в котором отсутствуют подвижные элементы. В верхней части корпуса расположены загрузочная заслонка 13 и выходной штуцер синтез-газа 1, а в нижней части – колосниковая решётка 8, форсунки подачи пара 12 и выгрузная заслонка 11. Пар вырабатывается в парогенераторе и подаётся по коллектору 9. Корпус нагревается от электронагревателя. Температура устанавливается при помощи регулятора напряжения 7. Для снижения потерь в окружающую среду снаружи газификатор покрыт теплоизолирующим материалом 6, в верхней части расположен также конденсатор 4 с конденсатоотводчиком 3 и патрубком для отвода синтез-газа 2.

Особенность данной установки, по сравнению с аналогами – внешний подвод тепла. Тем самым снижается образование диоксида углерода и оксидов азота [1; 12].

Эксперименты проводились компетентным персоналом с привлечением аккредитованной лаборатории поверенными приборами и оборудованием.

**Материалы и методы.** Исследования по применению термических способов утилизации



- 1 – выходной штуцер синтез-газа; 2 – патрубок для отвода синтез-газа; 3 – конденсатоотводчик; 4 – конденсатор; 5 – корпус; 6 – теплоизолирующий материал; 7 – регулятор напряжения; 8 – колосниковая решётка; 9 – коллектор; 10 – парогенератор; 11 – выгрузная заслонка; 12 – форсунки подачи пара; 13 – загрузочная заслонка

Рисунок 3 – Установка для газификации помёта

отходов птицеводства реализуются с 2016 года по настоящее время на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». В период с 2021 по 2023 год в качестве объекта исследования согласована площадка крестьянско-фермерского хозяйства «Чербаев М.В.» Тетюшского муниципального района республики Татарстан по разведению сельскохозяйственной птицы поголовьем 5000 голов.

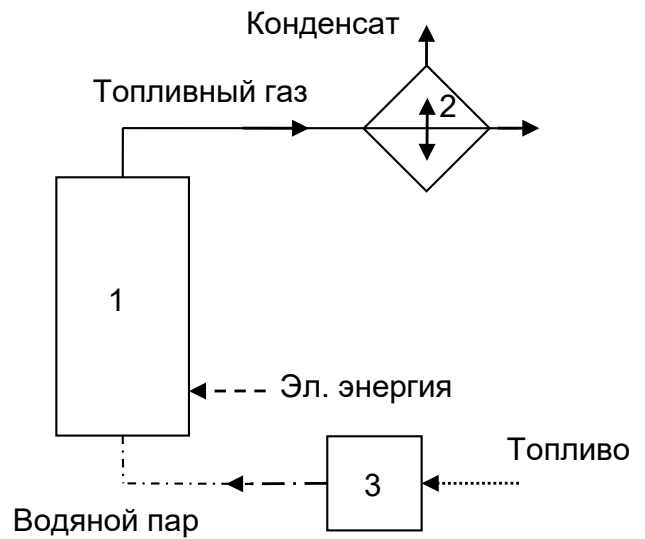
Проведенные исследования позволили выявить недостатки различных установок по термической утилизации отходов и выявить пути их решения. Результатом таких исследований стала разработанная газификационная установка, защищенная патентом Российской Федерации на изобретение № 2754911 «Установка для газификации углеродсодержащих отходов».

Дальнейший вектор исследований термических методов утилизации отходов птицеводства направлен на выявление путей энергосбережения. Таковым является метод графов, который широко применяется в электроэнергетике, экономике, науке и других отраслях [16; 17]. Применение графов в теплоэнергетических установках описывал еще Л. С. Попырин в своем труде «Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок»: графом в общем случае называют совокупность отрезков, обозначаемых дугами, и точек пересечения дуг – вершинами. Основная топологическая информация, заключенная в графе, состоит в графическом выражении связей между вершинами. Представление схемы энергетической установки в форме графа позволяет осуществить математически строгое и в то же время достаточно наглядное ее рассмотрение [18].

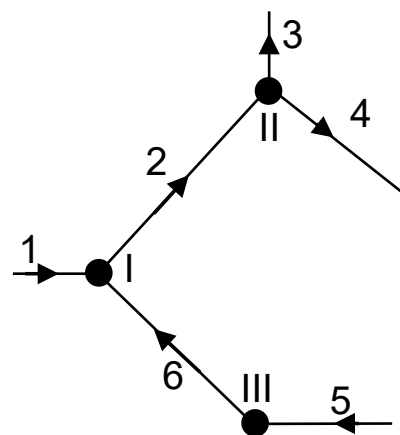
В данной статье рассмотрена технологическая схема газификации отходов птицеводства с позиции энергосбережения, поиска и выбора актуальных и эффективных мероприятий, к примеру, использование источников низкопотенциальной энергии (рисунок 4).

В данной технологической схеме предполагается, что получаемый топливный газ отводится внешнему потребителю и частично накапливается для дальнейшего использования на собственные нужды газификационной установки. Целесообразность данного варианта использования топливного газа требует отдельной проработки.

Как известно, любая схема может быть задана так называемой матрицей соединений вершин графа (рисунок 5) и дополненной матрицей видов связей по энергоносителям (таблица 2).



1 – газификационная установка; 2 – конденсатор-охладитель; 3 – парогенератор  
Рисунок 4 – Технологическая схема газификационной установки



I – газификационная установка; II – конденсатор-охладитель; III – парогенератор; 1–6 – связи между элементами оборудования  
Рисунок 5 – Граф технологической схемы газификационной установки

Таблица 2 – Матрица соединений элементов

Номер связи	Признак наличия связи для элемента оборудования		
	I	II	III
1	-1	-	-
2	1	-1	-
3	-	1	-
4	-	1	-
5	-	-	-1
6	-1	-	-

Обозначения в матрице «+1» и «-1» – исходящие и входящие внешние связи системы.

Описание связей следующее: 1 – электроэнергия; 2 – смесь топливного газа и различных примесей; 3 – конденсат; 4 – очищенный подготовленный топливный газ; 5 – топливо; 6 – водяной пар.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Эксперименты, проведенные на установке, позволили отметить, что теплотворная способность исходного сырья составляет 7000–9000 кДж, а синтез-газа после газификации с применением пара в качестве газифицирующего агента с учетом всех потерь достигала 12000 кДж/кг, что конкурентоспособно с природными ископаемыми топливами для использования на электрогенераторах с выработкой электрической энергии для резервирования или полного самообеспечения птицефабрики [19].

Полученные результаты представлены в таблице 3.

В структуре энергетического баланса наблюдается расход природного газа для выработки электрической энергии. При этом добавление выработанного синтез-газа в процесс позволит снизить расход природного топлива.

Синтез-газ по своему составу включает такие примеси, как  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ , в % объемах 0,4; 7,75; 0,27 и 0,4 соответственно.

При этом стоит отметить низкое содержание  $N_2$ , которое достигается при исключении из реакции воздуха как газифицирующего агента.

На этапе анализа графоаналитического метода приведем следующие результаты: граф и матрица на рисунке 4 и в таблице 1 дают наглядное представление о технологической схеме газификационной установки по утилизации отходов птицеводства с получением топливного газа и золы на удобрение. Наличие исходящих связей из элемента II (энергоноситель 4) и входящих связей элементов I (энергоноситель 1) и элемент III (энергоноситель 6) наглядно прослеживается необходимость замкнуть данные элементы энергетически связями.

В результате анализа данного графа автора-

ми предлагаются следующие энергосберегающие и ресурсосберегающие решения, представленные в виде графа (рисунок 6).

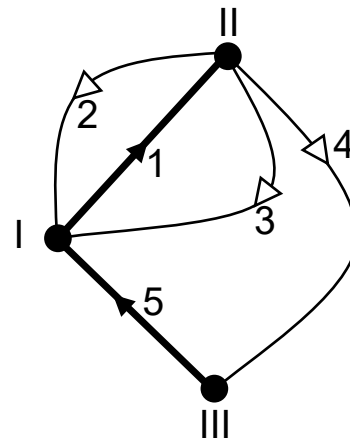


Рисунок 6 – Граф оптимизации технологической схемы утилизации отходов птицеводства

На графе имеются дуги, которые соответствуют различным энергоэффективным мероприятиям. Таким образом, авторы визуализировали возможные решения технологической схемы (рисунок 3) в направлении энергетической независимости самой газификационной установки. В качестве энергоресурсосберегающих мероприятий могут выступать:

- использование части топливного газа на собственные нужды для выработки водяного пара (дуга 4);
- использование части топливного газа для выработки электрической энергии (дуга 3);
- использование низкопотенциальной энергии конденсата для предварительного подсушивания исходного сырья (дуга 2). Под эксергетическим потенциалом понимается максимальное количество полезной работы, которое можно получить в данном случае от образовавшегося продукта.

Каждое из этих мероприятий (инженерных решений) имеет свои затраты (закупка оборудования и др.) и экономический эффект (количество экономии природного топлива и энергии, которые заме-

Таблица 3 – Структура энергетического баланса газификационной установки на 1 кг сырья

Потребление			Источник		
Значение	кДж	%	Значение	кДж	%
Парогенератор	85,3	0,21	Газификационная установка	10 800	13,08
Газификационная установка	41 280	99,79	Электрогенератор	41 280	50,00
			Природное топливо	30 480	36,92
Итого	41 365,3	100	Итого	82 560	100

щены топливным газом, полученным из отходов птицеводства).

Кроме энергетической составляющей возникает задача реализации получаемой золы. Зола после газификационной установки пригодна в качестве минерального удобрения, и внесение его должно быть оправданным.

Анализ госдоклада Минэкологии Республики Татарстан показал, что в 2022 году в республике образовалось 627 тыс. тонн органического сырья – помет птицы, в том числе с подстилкой. Для принятия решения о направлении реализации по внесению на поля авторами отобрана наиболее ценная культура – озимая пшеница.

Возделывание сельскохозяйственных культур приводит к выносу элементов питания с урожаем. По пшенице показатели составляют: калий – 112 кг/га, фосфор – 92 кг/га. При возделывании современных сортов озимой пшеницы положительный баланс азота, фосфора и калия может быть обеспечен лишь внесением высоких доз удобрений. Под озимые культуры требуется 34 кг/га калия и 25 кг/га фосфора [20]. Калий и фосфор возможно восполнить получаемой золой [21; 22].

По имеющимся данным [23], проанализирована посевная площадь наиболее ценной культуры – озимой пшеницы. После термической утилизации получается зола, которая достигает 20 % от сжигаемой массы, в дальнейшем она пригодна для использования в качестве удобрения и не требует дополнительной обработки. Анализ использования золы показал, что полученная зола содержит оксид калия ( $K_2O$ ) – 15,5 %, оксид фосфора ( $P_2O_5$ ) – 23,9 %.

Рассчитав количество получаемого продукта (золы), можем сопоставить количество получаемого продукта и востребованность в данном удобрении по районам республики.

Задавшись критериями оценки, которыми являются – расстояния до пункта назначения и необходимость внесения минеральных удобрений, авторы пришли к выводу, что концепция минимального расстояния до цели не меняется. Золу следует направлять от ближайших центров расположения газификационных установок, находящихся в районах с наибольшим количеством образования органического сырья (таблица 4).

После анализа результатов наблюдается недополучение удобрения в зоне ответственности Лениногорского центра.

Для того чтобы найти наилучшие схемы обеспечения удобрениями районов в зоне ответственности Лениногорского центра, прибегнем к методу транспортной задачи.

Математический аппарат транспортной задачи записывается следующим образом:

$$F = \sum \sum c_{ij} x_{ij}, \quad (5)$$

при условиях:

$$\sum x_{ij} = a_i, i = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$\sum x_{ij} = b_j, j = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$x_{ij} \geq 0,$$

где  $x$  – расстояния от центров инноваций до районов снабжения;  $c$  – переменная;  $a$  – запасы;  $b$  – потребность.

По результатам расчетов предлагается наиболее приемлемый (оптимальный) план распределения получаемого удобрения по наиболее краткому маршруту.

Из Лаишевского центра выявленный избыток удобрения необходимо направить в Черемшанский район в количестве 0,093 тыс. т и в Аксубаевский район в количестве 0,338 тыс. т.

Из Тукаевского центра избыток удобрения необходимо направить в Черемшанский район в количестве 0,529 тыс. т, Бугульминский район в количестве 0,122 тыс. т, Альметьевский район в количестве 0,035 тыс. т, Азнакаевский район в количестве 0,024 тыс. т, Ютазинский район в количестве 0,02 тыс. т.

Из Лениногорского центра необходимо распределить получаемый продукт следующим образом: оставить на собственные сельскохозяйственные поля в количестве 0,585 тыс. т, остаток перераспределить по следующим маршрутам: в Бугульминский район направить 0,184 тыс. т, в Бавлинский район направить 0,091 тыс. т.

По данной схеме распределения в Лаишевском центре на складах остается невостребованным 10,009 тыс. т удобрения. Данное удобрение рекомендуется реализовать в розничной сети.

Таблица 4 – Результаты анализа распределения районов для передачи золы на сельхозземли для внесения под озимую пшеницу

Муниципальный район	Количество получаемого удобрения (Р,К), тыс.т	Расчетное количество удобрений с учетом посевных площадей, тыс.т	Δ избыток/недополучение, +/- %
Тукаевский центр	24,034	13,593	+43
Лаишевский центр	24,3492	23,621	+3
Лениногорский центр	0,8668	2,025	-57



**Заключение.** Изучение литературных источников показало, что существующие методики компостирования, т. е. длительной выдержки в буртах, могут быть ускорены благодаря технологии термической утилизации (получения топливного газа) на газификационных установках. Данная технология термической утилизации рекомендуется к внедрению на объектах первой категории негативно-го воздействия на окружающую среду. К таковым относятся птицеводческие предприятия с поголовьем 2 млн голов и более. В результате предварительных расчетов и проведенных лабораторных исследований затраченная энергия к получаемой составляет 50 %, т. е. полученный топливный газ в состоянии обеспечить собственные нужды газификационной установки (нагрев газификационной камеры, генерация водяного пара и др.) и снабжать объекты первой категории, требующие бесперебойного энергоснабжения энергией, получаемой от высококалорийного топливного газа [5].

Используя предложенный метод графов, можно наглядно представить перспективные направления оптимизации технологической схемы утилизации отходов птицеводства. Метод графов позволяет на более качественном уровне выявить положительные и отрицательные материальные и энергетические потоки до разработки экспериментального/лабораторного образца. Данные методы являются хорошим инструментом определения всех внутренних связей потоков материи и энергии, «узких» мест в технологической схеме установки и подготовки к следующему этапу – математическому представлению работы установки, его основных и вспомогательных узлов.

Также метод графов может использоваться для представления региональной схемы утилизации отходов птицеводства от единичной установки до разветвленной сети станций с газификационными установками. Порядок выбора вариантов представляется следующим образом:

- формирования перечня альтернативных вариантов решения;
- формирование критериев оценки;
- получение оценок альтернатив;
- выбор лучшей альтернативы.

Применение данного метода позволит выбрать актуальное решение усовершенствования технологической схемы и использование низкопотенциального тепла на собственные нужды.

Следует пояснить, что данные результаты являются только исходной составляющей в алгоритме ведения научных исследований. Дальнейшая работа заключается в оценке каждого конкретного направления оптимизации и энергоресурсосбере-

жения, к примеру, методом иерархий, а также анализа литературы и апробации полученных промежуточных результатов.

#### Список источников

1. Фахреев Н.Н. Теоретические и экспериментальные исследования при разработке новой газификационной установки // Известия Дагестанского ГАУ. 2022. № 4 (16). С. 302-307.
2. Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года: В 8 т. / Федеральная служба гос. статистики. М.: Статистика России, 2018. 361 с.
3. Бартновский С.П. Антропогенное воздействие на окружающую среду промышленного птицеводства (на примере ОАО «Шушенская птицефабрика») // Экология южной Сибири и сопредельных территорий. 2015. Вып. 19. Т. 1. С. 135.
4. Implementation of poultry waste disposal technology for energy and fertilizer production / N.N. Fakhreev [et al.] // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 411. P. 01065.
5. Зиганшин Б.Г., Гайфуллин И.Х., Фахреев Н.Н. Математическое моделирование и экспериментальные исследования газификации отходов птицеводства // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 3 (47). С. 78-84.
6. Математический аппарат расчета конструктивных решений газификационной установки / Б.Г. Зиганшин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 1 (69). С. 60-67.
7. Зиганшин Б.Г., Фахреев Н.Н. Применение газификационной установки для выработки электроэнергии в двигателях внутреннего // Чтения академика В.Н. Болтянского: сборник статей. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2023. С. 64-68.
8. Eri Q., Peng J., Zhao X. CFD-моделирование паровой газификации биомассы в псевдооживленном слое на основе многокомпонентной многоступенчатой кинетической модели // Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 129. Pp. 1358-1368.
9. Gambarotta A., Morini M., Zubani A. Synthesis Gas Composition Prediction for Underground Coal Gasification Using a Thermochemical Equilibrium Modeling Approach // Applied Energy. 2018. Vol. 227. P. 119-127.
10. Environmental and economic sustainability of poultry litter gasification for electricity and heat generation / K. Harish [et al.] // Waste Management. 2019. Vol. 95. Pp. 182-191.
11. Katsaros G., Shankar Pandey D., Horvart A., Tassou S. Low temperature gasification of poultry

litter in a lab-scale fluidized reactor // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 161. Pp. 57-65.

12. Silva J.D., Oliveira C.C.B. Fluidynamics modelling for a fixed bed gasifier using Laplace transform finite difference method // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 42. Pp. 753-769.

13. Kaushal P., Tyagi R. Advanced Simulation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed Reactor Using ASPEN Plus // *Renewable Energy*. 2017. Vol. 101. Pp. 629-636.

14. Vaezi M., Passandideh-Fard M., Moghiman M., Charmchi M. On a methodology for selecting biomass materials for gasification purposes // *Fuel Processing Technology*. 2012. Vol. 98. Pp. 74-81.

15. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 110. Pp. 188-206.

16. Ernst S., Kotulski L., Sędziwy A., Wojnicki I. Graph-Based Computational Methods for Efficient Management and Energy Conservation in Smart Cities // *Energies*. 2023. Vol. 16 (7). P. 3252.

17. Mark de Berg a, Sándor Kisfaludi-Bak a, Gerhard Woeginger The complexity of Dominating Set in geometric intersection graphs // *Theoretical Computer Science*. 2019. Vol. 769. Pp. 18-31.

18. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1978. 416 с.

19. Зиганшин Б.Г., Гайфуллин И.Х., Фахреев Н.Н. Математическое моделирование и экспериментальные исследования газификации отходов птицеводства // *Техника и технологии в животноводстве*. 2022. № 3 (47). С. 78-84.

20. Золкина Е.И. Влияние минеральных удобрений на урожайность сортов озимой пшеницы и показатели баланса элементов питания на дерново-подзолистой супесчаной почве нечерно-земной зоны // *Таврический вестник аграрной науки*. 2018. № 3 (15). С. 34-46.

21. Динамика плодородия почв республики Татарстан / П.А. Чекмарев [и др.] // *Достижения науки и техники АПК*. 2014. № 4. С. 6-9.

22. Известкование кислых почв в Республике Татарстан / А.А. Лукманов [и др.] // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 9. С. 15-18.

23. Сайт сельскохозяйственной информационной площадки «Сельхозпортал» [Электронный ресурс]. URL: <https://сельхозпортал.рф> (дата обращения: 19.12.2023).

## References

1. Fakhreev N.N. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya pri razrabotke novoi gazifikatsionnoi ustanovki [Theoretical and experimental studies in the development of a new gasification plant]. *Izvestiya Dagestanskogo GAU*. 2022; (4-16): 302-307. (In Russ).

2. Itogi Vserossiiskoi sel'skokhozyaistvennoi perepisi 2016 goda [Results of the All-Russian Agricultural Census 2016]. *Federal'naya sluzhba gos. statistiki*. M.: Statistika Rossii; 2018: 361. (In Russ).

3. Bartnovsky S.P. Antropogennoe vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu promyshlennogo ptitsevodstva (na primere OAO «Shushenskaya ptitsefabrika») [Anthropogenic impact on the environment of industrial poultry farming (using the example of JSC «Shushenskaya Poultry Farm»)]. *Ekologiya yuzhnoi Sibiri i sopredel'nykh territorii*. 2015; (19-1): 135. (In Russ).

4. Fakhreev N.N. et al. Implementation of poultry waste disposal technology for energy and fertilizer production. *E3S Web of Conferences*. 2023; (411): 01065.

5. Ziganshin B.G., Gaifullin I.Kh., Fakhreev N.N. Matematicheskoe modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gazifikatsii otkhodov ptitsevodstva [Mathematical modeling and experimental studies of gasification of poultry waste]. *Machinery and technologies in livestock*. 2022; (3-47): 78-84. (In Russ).

6. Ziganshin B.G. et al. Matematicheskii apparat rascheta konstruktsionnykh reshenii gazifikatsionnoi ustanovki [Mathematical apparatus for calculating structural solutions of a gasification plant]. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2023; (18-1-69): 60-67. (In Russ).

7. Ziganshin B.G., Fakhreev N.N. Primenenie gazifikatsionnoi ustanovki dlya vyrabotki elektroenergii v dvigatelyakh vnutrennego [The use of a gasification plant for generating electricity in internal engines]. *Collection of articles «Readings by Academician V.N. Boltyansky»*. M.: ООО «Sam Poligrafist»; 2023: 64-68. (In Russ).

8. Eri Q., Peng J., Zhao X. CFD-modelirovanie parovoi gazifikatsii biomassy v psevdoozhizhenom sloe na osnove mnogokomponentnoi mnogostupenchatoi kineticheskoi modeli [CFD modeling of steam gasification of biomass in a fluidized bed based on a multicomponent multistage kinetic model]. *Applied Thermal Engineering*. 2018; (129): 1358-1368. (In Russ).

9. Gambarotta A., Morini M., Zubani A. Synthesis Gas Composition Prediction for Underground Coal Gasification Using a Thermochemical

Equilibrium Modeling Approach. *Applied Energy*. 2018; (227): 119-127.

10. Harish K. et al. Environmental and economic sustainability of poultry litter gasification for electricity and heat generation. *Waste Management*. 2019; (95): 182-191.

11. Katsaros G., Shankar Pandey D., Horvart A., Tassou S. Low temperature gasification of poultry litter in a lab-scale fluidized reactor. *Energy Procedia*. 2019; (161): 57-65.

12. Silva J.D., Oliveira C.C.B. Fluidynamics modelling for a fixed bed gasifier using Laplace transform finite difference method. *Procedia Engineering*. 2012; (42): 753-769.

13. Kaushal P., Tyagi R. Advanced Simulation of Biomass Gasification in a Fluidized Bed Reactor Using ASPEN Plus. *Renewable Energy*. 2017; (101): 629-636.

14. Vaezi M., Passandideh-Fard M., Moghiman M., Charmchi M. On a methodology for selecting biomass materials for gasification purposes. *Fuel Processing Technology*. 2012; (98): 74-81.

15. Ramos A., Monteiro E., Rouboa A. Numerical approaches and comprehensive models for gasification process: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019; (110): 188-206.

16. Ernst S., Kotulski L., Sędziwy A., Wojnicki I. Graph-Based Computational Methods for Efficient Management and Energy Conservation in Smart Cities. *Energies*. 2023; (16-7): 3252.

17. Mark de Berg a, Sándor Kisfaludi-Bak a, Gerhard Woeginger The complexity of Dominating Set in geometric intersection graphs. *Theoretical Computer Science*. 2019; (769): 18-31.

18. Popyrin L.S. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teploenergeticheskikh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of thermal power plants]. M.: Energiya; 1978: 416. (In Russ).

19. Ziganshin B.G., Gaifullin I.Kh., Fakhreev N.N. *Matematicheskoe modelirovanie i eksperimental'nye issledovaniya gazifikatsii otkhodov ptitsevodstva* [Mathematical modeling and experimental studies of gasification of poultry waste]. *Machinery and technologies in livestock*. 2022; (3-47): 78-84. (In Russ).

20. Zolkina E.I. Vliyanie mineral'nykh udobrenii na urozhainost' sortov ozimoi pshenitsy i pokazateli balansa elementov pitaniya na dernovo-podzolistoi supeschanoi pochve necherno-zemnoi zony [The influence of mineral fertilizers on the yield of winter wheat varieties and the balance of nutrients on sod-podzolic sandy loam soil of the non-black earth

zone]. *Taurida herald of the agrarian sciences*. 2018; (3-15): 34-46. (In Russ).

21. Chekmarev P.A. et al. Dinamika plodorodiya pochv respubliky Tatarstan [Dynamics of soil fertility in the Republic of Tatarstan]. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2014; (4): 6-9. (In Russ).

22. Lukmanov A.A. et al. Izvestkovanie kislykh pochv v Respublike Tatarstan [Liming of acidic soils in the Republic of Tatarstan]. *Achievements of science and technology in agro-industrial complex*. 2021; (35-9): 15-18. (In Russ).

23. Sait sel'skokhozyaistvennoi informatsionnoi ploshchadki «Sel'khozportal» [Website of the agricultural information platform «Agricultural Portal»] [Internet]. URL: <https://selkhozportal.pf> (Accessed: 19.12.2023).

#### Информация об авторах

Б.Г. Зиганшин – доктор технических наук, профессор; AuthorID 326952.

Н.Н. Фахреев – AuthorID 824461.

И.Х. Гайфуллин – кандидат технических наук; AuthorID 797764.

Б.Л. Иванов – кандидат технических наук, доцент; AuthorID 703475.

А.В. Шорников – AuthorID 225471.

#### Information about the author

B.G. Ziganshin – Doctor of Technical Sciences, Professor; AuthorID 326952.

N.N. Fakhreev – AuthorID 824461.

I.Kh. Gaifullin – Candidate of Technical Sciences; AuthorID 797764.

B.L. Ivanov – candidate of technical sciences, associate professor; AuthorID 703475.

A.V. Shornikov – AuthorID 225471.

Статья поступила в редакцию 24.12.2023; одобрена после рецензирования 22.01.2024; принята к публикации 19.03.2024.

The article was submitted 24.12.2023; approved after reviewing 22.01.2024; accepted for publication 19.03.2024.