







## Управление технологией получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза

Виталий Н. Василенко	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kaf-mapp@vsuet.ru">kaf-mapp@vsuet.ru</a>	 0000-0002-1547-9814
Ирина С. Юрова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:yurova_ira83@mail.ru">yurova_ira83@mail.ru</a>	 0000-0002-5024-5888
Максим В. Копылов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kopylov-maks@yandex.ru">kopylov-maks@yandex.ru</a>	 0000-0003-2678-2613
Эдуард Ю. Реветнев	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kaf-mapp@vsuet.ru">kaf-mapp@vsuet.ru</a>	 0000-0000-0000-0000
Артем Г. Кочарьян	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kaf-mapp@vsuet.ru">kaf-mapp@vsuet.ru</a>	 0000-0000-0000-0000
Даниил Р. Кулигин	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kuligin470@gmail.com">kuligin470@gmail.com</a>	 0009-0007-3133-4467

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Аннотация.** В работе представлено научно обоснованное решение для комплексной автоматизации производства полнорационных комбикормов, интегрированное с автономной биогазовой энергосистемой. Разработана функциональная архитектура и программно-логический алгоритм микропроцессорного управления, обеспечивающий непрерывную обработку многомерных технологических данных в режиме реального времени. Методологический подход опирается на синтез детерминированных моделей массо- и теплопереноса с экспериментальными характеристиками распределённых контуров регулирования. Интеграция абсорбционного теплового насоса в технологию позволила оптимизировать генерацию и каскадное распределение высоко- и низкопотенциальных энергоносителей, что обеспечило поддержание строго заданных термодинамических режимов на критических стадиях: анаэробной ферментации субстратов, влаготепловой обработке, инфракрасной микронизации зерна, а также конвективной сушке и принудительном охлаждении кормовой смеси. Управляющий контур функционирует на принципах адаптивно-предиктивного регулирования, базируясь на непрерывном мониторинге ключевых физико-химических индикаторов с автоматической коррекцией исполнительных приводов. Вычислительное ядро системы оперирует интеративными методами решения дифференциальных уравнений нестационарного теплообмена, что позволяет в реальном времени компенсировать стохастические флуктуации физико-химического состава сырья и нивелировать кумулятивное накопление погрешностей измерений. Архитектура распределённого датчикового поля обеспечивает многоуровневую верификацию входных сигналов, трансформируя традиционную линейную энергетическую схему в высокоинтегрированную регенеративную сеть замкнутого цикла с минимизированными эксергетическими потерями. Многоуровневая очистка биогаза, включающая криогенное осушение, водную абсорбцию и каталитическую десульфуризацию, сопряжённая с рекуперативными теплообменными циклами, существенно повысила эксергетическую эффективность линии. Дополнительно реализован механизм многофакторной оптимизации, учитывающий нелинейные взаимосвязи между кинетикой метаногенеза и гидродинамикой реакторного пространства. Внедрение цифровых двойников контуров терморегулирования позволило минимизировать инерционность отклика системы на возмущающие воздействия, повысив устойчивость технологических переходных процессов. Данный подход обеспечивает синергетическое согласование энергетических потоков. Программная логика реализует предиктивную стабилизацию биокинетических параметров с учётом сезонной динамики влажности сырья, минимизируя ингибирующее влияние кислотных метаболитов на микробиоценоз. Внедрение системы гарантирует стабильный выход стандартизированного биопластика, соответствие продукции зоотехническим регламентам, сужение технологического рассеяния показателей качества на 0,1–0,5 % и снижение удельных энергозатрат на 7–10 %, формируя теоретико-прикладную основу для замкнутого ресурсосберегающего кормопроизводства.

**Ключевые слова:** микропроцессорное управление, алгоритм, биогаз, технология полнорационных комбикормов.

## Management of technology for producing complete feed using biogas

Vitalii N. Vasilenko	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kaf-mapp@vsuet.ru">kaf-mapp@vsuet.ru</a>	 0000-0002-1547-9814
Irina S. Yurova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:yurova_ira83@mail.ru">yurova_ira83@mail.ru</a>	 0000-0002-5024-5888
Maxim V. Kopylov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kopylov-maks@yandex.ru">kopylov-maks@yandex.ru</a>	 0000-0003-2678-2613
Eduard Yu. Revetnev	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kaf-mapp@vsuet.ru">kaf-mapp@vsuet.ru</a>	 0000-0000-0000-0000
Artem G. Kocharyan	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kaf-mapp@vsuet.ru">kaf-mapp@vsuet.ru</a>	 0000-0000-0000-0000
Daniil R. Kuligin	<sup>1</sup>	<a href="mailto:kuligin470@gmail.com">kuligin470@gmail.com</a>	 0009-0007-3133-4467

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia

Для цитирования

Василенко В.Н., Юрова И.С., Копылов М.В., Реветнев Э.Ю., Кочарьян А.Г., Кулигин Д.Р. Управление технологией получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 112–120. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-112-120

For citation

Vasilenko V.N., Yurova I.S., Kopylov M.V., Revetnev E.Yu., Kocharyan A.G., Kuligin D.R. Management of technology for producing complete feed using biogas. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 112–120. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-112-120

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

**Abstract.** The paper presents a scientifically based solution for comprehensive automation of the production of full-ration feed, integrated with an autonomous biogas power system. A functional architecture and a program-logic algorithm of microprocessor control have been developed, which provides continuous processing of multidimensional technological data in real time. The methodological approach is based on the synthesis of deterministic models of mass and heat transfer with experimental characteristics of distributed control circuits. The integration of the absorption heat pump into the technology made it possible to optimize the generation and cascade distribution of high- and low-potential energy carriers, which ensured the maintenance of strictly defined thermodynamic modes at critical stages: anaerobic fermentation of substrates, moisture-heating treatment, infrared micronization of grain, as well as convective drying and forced cooling of the feed mixture. The control circuit operates on the principles of adaptive-predictive control, based on continuous monitoring of key physical and chemical indicators with automatic correction of actuator drives. The computing core of the system operates with interactive methods of solving differential equations of non-stationary heat exchange, which allows real-time compensation of stochastic fluctuations in the physical and chemical composition of the raw material and leveling the cumulative accumulation of measurement errors. The distributed sensor field architecture provides multi-level verification of input signals, transforming a traditional linear energy circuit into a highly integrated regenerative closed-loop network with minimized exergetic losses. Multilevel purification of biogas, including cryogenic drying, water absorption and catalytic desulfurization, coupled with recuperative heat exchange cycles, significantly increased the exergetic efficiency of the line. In addition, a multifactor optimization mechanism has been implemented that takes into account the nonlinear relationships between the kinetics of methanogenesis and the hydrodynamics of the reactor space. The introduction of digital twins of thermal control circuits made it possible to minimize the inertia of the system response to disturbing effects, increasing the stability of technological transients. This approach provides synergistic alignment of energy flows. Program logic implements predictive stabilization of biokinetic parameters taking into account the seasonal dynamics of raw material humidity, minimizing the inhibitory effect of acid metabolites on microbiocenosis. The introduction of the system guarantees a stable output of standardized biofuels, compliance of products with zootechnical regulations, narrowing the technological dispersion of quality indicators by 0.1-0.5% and reducing specific energy costs by 7-10%, forming a theoretical and applied basis for closed resource-saving feed production.

**Keywords:** microprocessor control, algorithm, biogas, complete feed technology.

## Введение

Полноценное питание животных и птицы неразрывно связано с разработкой новых энергосберегающих, безотходных и экологически безопасных технологий полнорационных комбикормов, сбалансированных по питательной ценности на основе интенсификации технологических процессов, эффективном применении современного оборудования, внедрению систем автоматического управления технологическими параметрами на базе микропроцессорной техники, обеспечивающих снижение себестоимости готовой продукции [1, 2].

Для снижения доли энергозатрат в структуре себестоимости кормов целесообразно использовать автономное энергоснабжение комбикормового производства за счет биотопливных ресурсов. Эффективным способом решения этой задачи является использование биогаза, полученного из отходов животноводства. Особенно остро эта проблема стоит в глубинных негазифицированных районах страны [3–8].

Наиболее перспективной в этом отношении является биогазовая технология полнорационных комбикормов с применением абсорбционного водоаммиачного теплового насоса (АБТН) [9]. Вовлечение АБТН в технологию позволило подготовить высоко-инизкопотенциальные энергоносители и обеспечить стабилизацию температурных режимов процессов анаэробного сбраживания субстратов при получении биогаза, влаготепловой обработки зерна перегретым паром, микронизации зерновых хлопьев, сушку и охлаждение полнорационного комбикорма.

Однако для снижения себестоимости готовых полнорационных комбикормов недостаточно реализованы возможности экономии теплоэнергетических ресурсов за счет разработки новых алгоритмов функционирования, оптимизации и управления процессами кормопроизводства.

Автоматизация технологии комбикормов достаточно сложна, поскольку связана с биологическими объектами, составом исходных и промежуточных продуктов микробиологического синтеза, необходимостью одновременного контроля разных физико-химических параметров. Многие параметры зависят от случайных факторов [10–13]. Основные требования, предъявляемые к современным системам управления – надежность, адаптивность (гибкость), возможность управления разнородными объектами и построения распределенных многоканальных систем. Наиболее полно соответствуют перечисленным требованиям системы управления, выполненные на базе микропроцессорной техники [14–18].

Цель работы: разработка алгоритма микропроцессорного управления технологией получения сухих CO<sub>2</sub>-экстрактов по информации о ходе технологических процессов, получаемой с датчиков, и формирование микропроцессором выходных сигналов, устанавливающих логическую последовательность подачи управляющих воздействий, обеспечивающих стабилизацию технологических параметров в диапазоне заданных значений.

### Методы

Для управления сложными технологическими процессами кормопроизводства, способными перерабатывать практически неограниченный объем информации разработана

функциональная схема микропроцессорного управления технологией получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза на основе новых научных данных (рисунок 1) [19–24].

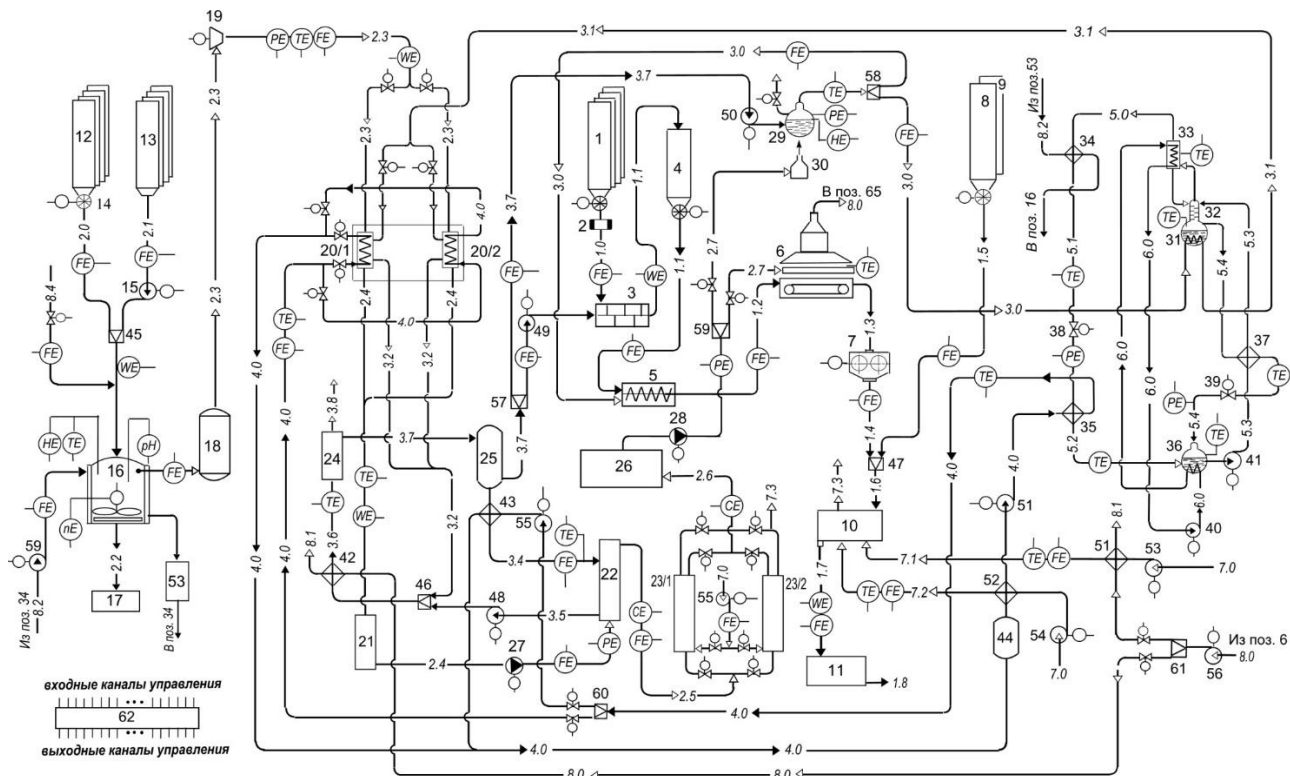


Рисунок 1. Функциональная схема микропроцессорного управления технологией получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза

Figure 1. Functional diagram of microprocessor control of the technology for producing complete compound feeds using biogas

Схема (рисунок 1) содержит бункеры для хранения зернового сырья 1 (пшеница, рожь, ячмень, тритикале и т. д.); магнитный сепаратор 2; увлажнительную машину 3; бункер для отволаживания зерна 4; пропариватель 5; микронизатор 6; оснащенный газовыми инфракрасными обогревателями с горелками; вальцовую плющильную машину 7; бункер для хранения белково-витаминных добавок и премиксов 8 и бункер для хранения минерального сырья (цеолит, бентонит, известняк, мел) 9; сушилку-охладитель 10 с секциями сушки и охлаждения; фасовочно-упаковочный аппарат 11, емкости для хранения твердого 12 и жидкого субстрата 13, питатель 14, насос 15, биореактор 16, оснащенный кавитационной установкой, внутренней тепловой рубашкой и мешалкой; хранилище сброженного субстрата 17, газгольдер 18, турбокомпрессор 19; двухсекционный аппарат для осушки исходного биогаза с секциями 20/1 и 20/2; сборник биогаза 21; колонку для очистки биогаза от углекислого газа 22; двухколонный каталитический реактор серочистки с колоннами 23/1 и 23/2; колонку

регенерации воды 24; сборник воды 25; буферную емкость для накопления очищенного биогаза 26; компрессоры 27, 28; парогенератор 29 с горелками 30; абсорбционный водоаммиачный тепловой насос, включающий кипятильник 31 с ректификатором 32, дефлегматор со змеевиком 33, конденсатор 34, испаритель 35, абсорбер 36, теплообменник 37; терморегулирующие вентили 38, 39, рециркуляционные насосы 40, 41; рекуперативный теплообменник для нагрева воды 42; рекуперативный теплообменник для охлаждения воды 43; сборник тосола 44; смесители 45, 46, 47; насосы 48, 49, 50; рекуперативный теплообменник для нагрева воздуха 51; рекуперативный теплообменник для охлаждения воздуха 52; вентиляторы 53, 54, 55, 56; распределители потоков 57, 58, 59, 60, 61; микропроцессор 62; материальные и тепловые потоки: 1.0 – зерно, 1.1 – увлажненное зерно; 1.2 – пропаренное зерно; 1.3 – микронизированное зерно; 1.4 – зерновые хлопья; 1.5 – смесь белково-витаминных добавок, премиксов и минеральных добавок (мела); 1.6 – полнорационный комбикорм; 1.7 –

высушенный полнорационный комбикорм; 1.8 – расфасованный комбикорм; 2.0 – твердый субстрат; 2.1 – жидкий субстрат; 2.2 – сброженный субстрат; 2.3 – исходный биогаз; 2.4 – осушенный биогаз; 2.5 – биогаз, очищенный от углекислого газа; 2.6 – обессеренный биогаз; 2.7 – очищенный биогаз; 3.0 – перегретый пар; 3.1 – низкопотенциальный пар; 3.2 – вода от размораживания снеговой шубы; 3.3 – конденсат; 3.4 – охлажденная вода; 3.5 – вода, обогащенная углекислым газом; 3.6 – нагретая вода; 3.7 – очищенная вода; 3.8 – углекислый газ; 4.0 – тосол; 5.0 – пары аммиака, 5.1 – жидкий (сконденсированный) аммиак; 5.2 – испаренный аммиак; 5.3 – крепкий водоаммиачный раствор; 5.4 – слабый водоаммиачный раствора; 6.0 – оборотная вода; 7.0 – атмосферный воздух; 7.1 – нагретый воздух, 7.2 – охлажденный воздух; 7.3 – отработанный воздух; 8.0 – отходящие газы; 8.1 – отработанные отходящие газы; 8.2 – циркулирующая вода; датчики: расхода – FE; температуры – TE; уровня – HE; давления – PE; концентрации – SE; значения pH.

Исходное зерновое сырье из зерновых бункеров 1 через магнитный сепаратор 2 подается в увлажнительную машину 3 до достижения влажности 20–25%. Увлажненное зерно направляется в бункер для отволаживания зерна 4, и далее в пропариватель 5, в котором осуществляется влаготепловая обработка зерна перегретым паром в течение 10 мин при температуре 100–150 °С. Пропаренное зерно подается в микронизатор 6, в котором в течение 40–90 с зерно подвергается инфракрасному нагреву при температуре 95–125 °С и плотности падающего потока от излучения инфракрасных обогревателей 16,3–20,5 кВт/м<sup>2</sup>. Микронизированное зерно проходит через вальцы плющильной машины 7 с зазором между вальцами 0,40–0,55 мм с получением зерновых хлопьев, которые смешиваются со смесью белково-витаминных добавок, премиксов и мела в смесителе 47.

Полученный после смесителя 47 полнорационный комбикорм сначала высушивается в сушилке-охладителе 10 при температуре 80–90 °С и скорости сушильного агента 0,4–0,7 м/с до влажности 8–9%, а затем охлаждается до температуры окружающей среды охлажденным воздухом с температурой 7–10 °С, после чего направляется в фасовочно-упаковочный аппарат 11.

Для подготовки биогаза субстраты из емкости для хранения твердого субстрата 12 дозатором 14 и из емкости для хранения жидкого субстрата 13 насосом 15 смешиваются в смесителе 45 и отводятся в биореактор 16, оснащенный кавитационной установкой, внутренней тепловой рубашкой и мешалкой.

Сброженный субстрат из биореактора отводится в хранилище 17, а полученный исходный биогаз направляется в газгольдер 18. Из газгольдера биогаз турбокомпрессором 19 подается под давлением 2 МПа в секцию 20/1 двухсекционного аппарата для осушки биогаза. Влага, содержащаяся в биогазе, конденсируется в снеговую шубу за счет рекуперативного теплообмена с тосолом. При этом секция двухсекционного аппарата для осушки природного газа 20/2, работающая в режиме регенерации, размораживается отработанным перегретым паром, подаваемым из кипятильника 31.

В колонке 22 осуществляется абсорбция углекислого газа из исходного биогаза охлажденной водой до содержания углекислого газа 11% об.

Подготовка охлажденной воды осуществляется в рекуперативном теплообменнике 42 посредством рекуперативного теплообмена с тосолом. Вода, обогащенная углекислым газом, отводится из колонки 22 насосом 48 и вместе с водой образовавшейся при размораживании секции двухсекционного аппарата для осушки биогаза подается в рекуперативный теплообменник 42, в котором нагревается до температуры 50–60 °С при теплообмене с отходящими из микронизатора газами, обеспечивая испарение углекислого газа из воды в колонке 24, с последующим отводом в сборник воды 25.

Из сборника 25 насосами 49 и 50 через распределитель 57 вода, очищенная от CO<sub>2</sub>, подается соответственно в увлажнительную машину 3 и на пополнение уровня воды в парогенераторе 29.

После извлечения углекислого газа биогаз из колонки 22 подается в одну из колонн 23/1 и 23/2 двухколонного каталитического реактора сероочистки, в которой проводится непрерывная десульфуризация биогаза. Осуществляется переменный режим работы колонн реактора: в колонне 23/1 протекает процесс химического связывания сероводорода с адсорбентом, а в колонне 23 / 2 – регенерация адсорбента продувкой атмосферным воздухом, подаваемым по потоку 7.0 вентилятором 55 с выводом отработанного воздуха в атмосферу по потоку 7.3.

Очищенный биогаз из каталитического реактора сероочистки отводится в буферную емкость 26, затем подвергается компрессионному сжатию в компрессоре 28 и под давлением 1,2 МПа подается на сжигание в горелки микронизатора 6 и в горелки парогенератора 30.

При сжигании очищенного биогаза в горелках парогенератора осуществляется непрерывная генерация перегретого пара с температурой 150 °С и его подача через распределитель 58 в пропариватель 5 и в змеевик кипятильника 31 для функционирования АБТН.

Отработанный перегретый пар после кипятильника 31 по потоку 3.1 направляется в секцию двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающую в режиме регенерации.

Отходящие после микронизации газы с температурой 90 °С через распределитель 61 направляются в теплообменник для нагревания воды 42, а также в теплообменник 51 для нагревания воздуха, который затем по потоку 7.1 вентилятором 53 подается в секцию сушки сушилки-охладителя 10 в качестве сушильного агента.

Подготовка охлажденного воздуха с температурой 7–10 °С осуществляется в рекуперативном теплообменнике 52 при теплообмене с тосолом и вентилятором 63 по потоку 7.2 подается в секцию охлаждения сушилки-охладителя 10 для охлаждения полнорационного комбикорма до температуры окружающей среды.

Теплота конденсации паров аммиака в конденсаторе 34 АБТН используется для нагревания воды, которая с температурой 50–60 °С, сначала насосом 59 подается в греющую рубашку биореактора, затем отводится в сборник 53 и далее в режиме замкнутого цикла возвращается в биореактор.

### Обсуждение

Информация о ходе технологических процессов при получении полнорационных комбикормов с помощью датчиков передается в микропроцессор 62, который по заложенному в него программно-логическому алгоритму осуществляет оперативное управление технологическими параметрами с учетом накладываемых на них ограничений, обусловленных рациональным использованием энергоносителей и снижением энергозатрат, приходящихся на единицу массы получаемого комбикорма.

В установленном режиме функционирования технологии получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза микропроцессор 62 непрерывно измеряет: расход твердого субстрата, подаваемого дозатором 14 по потоку 2.0, и жидкого субстрата, подаваемого насосом 15 по потоку 2.1 в биореактор 16; уровень субстратов в биореакторе; влажность, рН и температуру сбраживаемых субстратов в биореакторе; расход стабилизирующего раствора в биореактор по потоку 8.4; расход циркулирующей воды в рубашку биореактора по потоку 8.2; частоту вращения мешалки в биореакторе; расход биогаза из биореактора в газгольдер 18; расход, температуру, влагосодержание и давление биогаза, подаваемого турбогенератором 19 по потоку 2.3 из газгольдера 18 в одну из секций двухсекционного аппарата для осушки исходного биогаза 20/1 или 20/2;

расход тосола, подаваемого по потоку 4.0 из испарителя АБТН 35 в секцию двухсекционного аппарата для осушки исходного биогаза 20/1, работающей в режиме вымораживания влаги; температуру и влагосодержание биогаза на выходе из секции двухсекционного аппарата для осушки исходного биогаза 20/1, работающей в режиме вымораживания влаги; расход и давление биогаза, подаваемого по потоку 2.4 из секции двухсекционного аппарата для осушки исходного биогаза 20/1, работающей в режиме вымораживания влаги, в сборник биогаза 21; расход и температуру воды, подаваемой по потоку 3.4 из сборника 25 в колонку для очистки биогаза от углекислого газа 22; расход и концентрацию углекислого газа в биогазе, подаваемого по потоку 2.5 из колонки для очистки биогаза от углекислого газа 22 в колонну двухколонного каталитического реактора сероочистки 22/1, работающую в режиме физической адсорбции сероводорода; расход воздуха, подаваемого вентилятором 59 по потоку 7.0 в колонну двухколонного каталитического реактора сероочистки 22/2, работающую в режиме регенерации адсорбента; концентрацию сероводорода в биогазе, подаваемого из колонны двухколонного каталитического реактора сероочистки 23/1, работающей в режиме физической адсорбции сероводорода, в буферную емкость для накопления очищенного биогаза 26; давление биогаза, подаваемого из буферной емкости 26 в горелки микронизатора 6 и в горелки парогенератора 29; уровень воды давление в парогенераторе 27; температуру и расход пара, подаваемого в кипятильник 31 АБТН; температуру кипения аммиака в кипятильнике 31; температуру конденсации паров воды в дефлегматоре 33; давление жидкого аммиака перед испарителем 33; температуру паров кипящего аммиака, отводимого в абсорбер 34 АБТН; температуру тосола после испарителя 35;

В процессе подготовки биогаза микропроцессор 62 устанавливает заданное соотношение расходов жидкого и твердого субстрата в биореактор, подаваемых по потокам 2.0 и 2.1 в биореактор 16, и стабилизируют анаэробные условия сбраживания в мезофильном режиме при загрузке субстратов в биореактор 15–20%, определяемой по измеренным значениям уровня; кислотности в диапазоне рН 4,8–7,2; температуры 25–40 °С; продолжительности 3–5 сут.; или в термофильном режиме при загрузке 10–12%; кислотности рН 6,7–7,7; температуре 40–55 °С; продолжительностью 7–15 сут. и стабилизирует влажность субстратов в зимнее время 85% и в летнее время 92% воздействием на расход жидкого субстрата;

При отклонении рН от заданного интервала значений микропроцессор воздействуют на кислотность сбрасываемых субстратов путем дозирования стабилизирующего раствора щелочи или кислоты, подаваемых в биореактор по потоку 8.4.

Микропроцессор устанавливают заданное давление биогаза, подаваемого на осушку по потоку 2.3 воздействием на мощность регулируемого привода турбокомпрессора 19.

По измеренным значениям влагосодержания биогаза до и после секции двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания влаги, и его расхода микропроцессор определяет количество водяных паров в биогазе по формуле:

$$U = (x_{вых} - x_{вх}) \rho_{св} \times V,$$

где  $x_{вых}$ ,  $x_{вх}$  – влагосодержание биогаза на входе и выходе  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{св}$  – плотность биогаза,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $V$  – объемный расход биогаза,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , в соответствии с которыми устанавливает расход тосола, подаваемого по потоку 4.0 на вымораживание влаги из биогаза.

По измеренным значениям расхода и температуры биогаза на входе и выходе из секции двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания, а также температуры тосола на входе в эту секцию микропроцессор вычисляет текущее значение коэффициента теплопередачи  $k = Q / F \Delta t_{cp}$ , где  $Q = V_{ср} (t_1 - t_2)$  – количество теплоты, подаваемой биогазом в секцию двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания влаги,  $\text{кДж}/\text{ч}$ ;  $c$ ,  $\rho$  – средние значения теплоемкости,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , плотности,  $\text{кг}/\text{м}^3$ , биогаза;  $V$  – объемный расход биогаза,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $F$  – площадь охлаждающей поверхности секции двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t_{cp} = (t_1 - t_2) / \ln[(t_1 - t_3) / (t_2 - t_3)]$  – среднелогарифмический температурный напор,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1$ ,  $t_2$  – температура биогаза соответственно на входе и выходе из секции двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3$  – температура тосола на входе в секцию двухсекционного аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания влаги,  $^{\circ}\text{C}$ , и вырабатывает сигнал отклонения текущего значения коэффициента теплопередачи от заданного и корректирует соотношение расходов «биогаз – тосол» воздействием на расхода тосола. При превышении влагосодержания биогаза после осушки значения  $9 \text{ мг}/\text{м}^3$  микропроцессор переключает секцию аппарата для осушки биогаза, работающей в режиме вымораживания, на режим регенерации.

Микропроцессор осуществляет стабилизацию давления биогаза воздействием на мощность регулируемого привода компрессора 27, подаваемого по потоку 2.4 из сборника 21 в колонку 22 и осуществляет абсорбцию углекислого газа из исходного биогаза охлажденной водой до содержания углекислого газа 11% об.

При отклонении концентрации углекислого газа более 11% об микропроцессор снижает температуру охлажденной воды до  $10\text{--}20^{\circ}\text{C}$ , подаваемой в колонку 22 по потоку 3.4 из сборника 25 через рекуперативный теплообменник 43, воздействием на увеличение расхода тосола в теплообменник 43 посредством регулируемого привода насоса 55, обеспечивая интенсификацию рекуперативного теплообмена между охлажденной водой и биогазом.

В зависимости от расхода смеси отработанной воды после колонны 22, обогащенной углекислым газом, а также воды, образовавшейся при размораживании секции двухсекционного аппарата для осушки биогаза 20/1, подаваемой в рекуперативный теплообменник 42 через смеситель 46, микропроцессор устанавливает расход отходящих из микронизатора газов в теплообменник 42 и посредством рекуперативного теплообмена обеспечивает нагревание воды до температуры  $50\text{--}60^{\circ}\text{C}$  с испарением углекислого газа и его отводом из колонны 24 по потоку 3.8, а также отвод очищенной от углекислого газа воды по потоку 3.7 в сборник 25.

Микропроцессор контролирует концентрацию сероводорода в биогазе, подаваемого по потоку 2.6 в буферную емкость 26. При отклонении концентрации сероводорода от заданного значения  $20 \text{ мг}/\text{м}^3$  более, чем на  $0,1 \text{ мг}/\text{м}^3$ , колонна 23/1 отключается на регенерацию адсорбента продувкой атмосферным воздухом, подаваемым вентилятором 55, с выводом отработанного воздуха в атмосферу и подключается резервная колонна 23/2.

При управлении АБТН, обеспечивающего заданные параметры тосола после испарителя 35, микропроцессор: устанавливает температуру кипения водоаммиачного раствора в кипятильнике 31 воздействием на расход пара, подаваемого из парогенератора 29; регулирует температуру рециркулирующей воды в контуре 8.2 воздействием на ее расход с помощью насоса 59 через конденсатор АБТН 34; устанавливает температуру кипения аммиака, дросселирующего через терморегулирующий вентиль 38, воздействием на давление в испарителе 35 АБТН; регулирует давление абсорбции паров аммиака слабым водоаммиачным раствором в абсорбере 36 с воздействием на расход слабого водоаммиачного раствора в потоке 5.4, дросселирующего через

терморегулирующий клапан 37; контролирует температуру абсорбции в абсорбере 36. При переработке зерна в полнорационные комбикорма микропроцессор осуществляет управление технологией в следующей последовательности: стабилизирует влажность зерна при отволаживании в увлажнительной машине 3 воздействием на соотношение расходов зерна из бункеров 1 через магнитный сепаратор 2 и воды, подаваемой из сборника 25 насосом 49; в зависимости от расхода зерна, подаваемого на влаготепловую обработку по потоку 1.1, регулирует расход перегретого пара, подаваемого из парогенератора 29 в пропариватель 5 по потоку 3.0; устанавливает заданный режим инфракрасного нагрева зерна в микронизаторе 6; устанавливает заданный режим работы плющильной машины 7 при получении зерновых хлопьев: расстояние между вальцами и частоту их вращения; устанавливает соотношение расходов микронизированных зерен и смеси белково-витаминных добавок, премиксов и минеральных добавок (мела), подаваемых в смеситель 47; регулирует расход и температуру воздуха, подаваемого в сушилку-охладитель 10 на сушку полнорационного комбикорма и на его охлаждение воздействием на мощность приводов нагнетающих вентиляторов 53 и 54; регулирует интенсивность теплообмена воздуха с перегретым паром в рекуперативном теплообменнике 51 воздействием на расход перегретого пара, и на интенсивность теплообмена

воздуха с тосолом в рекуперативном теплообменнике 52 воздействием на расход тосола.

### Заключение

Предлагаемый алгоритм микропроцессорного управления технологией получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза:

- обеспечивает стабилизацию параметров в области рациональных значений, обеспечивающих максимальный выход биогаза при сбраживании субстратов и высокое качество полнорационных комбикормов за счет точности и надежности управления технологическими параметрами;

- сужает интервал отклонения параметров теплоносителей, подготовленных в парогенераторе и в абсорбционном водоаммиачном тепловом насосе, от заданных интервалов значений, а следовательно, стабилизирует режимы работы основного и вспомогательного оборудования в области стандартных свойств получаемого полнорационного комбикорма;

- сокращает поле допуска на показатели качества получаемого полнорационного комбикорма, снижая разброс значений на 0,1–0,5%;

- позволяет снизить удельные энергозатраты на 7–10% за счет рационального использования энергоносителей в замкнутых термодинамических циклах.

### Литература

- 1 Жакова К.И., Миронова Н.П. Современные тенденции развития технологий пищевых производств // Пищевая промышленность: наука и технологии. 2022. С. 6–12.
- 2 Лунин А. Биогазовые технологии – новый тренд экономики замкнутого цикла // EcoStandard.journal. 2023. URL: <https://journal.ecostandard.ru>
- 3 Кулагин В.А., Дунаева Н.В., Яковлева Д.Д. Новые технологии использования биогаза как способ решения экологических проблем // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 1. С. 87–102.
- 4 Вандышева М.С., Мартынычев А.В., Оболенский Н.В. Способ получения биогаза и удобрения // Карельский научный журнал. 2015. № 1. С. 157–159.
- 5 Зарипов Ш.С. Биогаз как альтернативный источник энергии для Республики Таджикистан // Введение в энергетику: сборник материалов II Всероссийской (с международным участием) молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 61.
- 6 Зебзеев Г.З. Биогаз как возобновляемый энергоресурс агропромышленных технологий // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов. 2017. С. 203–206.
- 7 Пат. 2742058 РФ, А23К 10/30, А23К 40/00. Комбинированная технологическая линия производства микронизированных хлопьев для стартерных и престартерных комбикормов для молодняка сельскохозяйственных животных с использованием очищенного биогаза / В.А. Афанасьев, А.Н. Остриков, А.А. Шевцов, А.В. Терехина, Д.А. Нестеров, И.С. Богомолов; заявитель и патентообладатель АО «НПЦ «ВНИИКП». № 2020101243; Заявл. 10.01.2020; Опубл. 02.02.2021. Бюл. № 4.
- 8 Пат. 2765578 РФ, А23N 17/00. Линия производства полнорационных комбикормов с использованием биогаза / В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, Н.А. Михайлова, И.В. Драган, С.И. Жильцова; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2021105622; Заявл. 16.04.2021; Опубл. 01.02.2022. Бюл. № 4.
- 9 Пат. 2797234 С1 РФ, А23К 40/00, А23N 17/00. Способ производства полнорационных комбикормов с использованием биогаза и установка для его осуществления / А.А. Шевцов, В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, И.В. Драган, И.Д. Еремин, И.Ю. Кочкин; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2022127131; Заявл. 19.10.2022; Опубл. 01.06.2023. Бюл. № 16.
- 10 Пат. 2832084 С1 РФ, А23N 17/00. Способ управления технологией получения полнорационных комбикормов с использованием биогаза / А.А. Шевцов, В.Н. Василенко, Л.Н. Фролова, А.Г. Кочарьян, И.Д. Еремин, В.С. Маркова; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2024103468; Заявл. 13.02.2024; Опубл. 19.12.2024. Бюл. № 35.
- 11 Киктев Н.А. Исследование и разработка комплекса технических средств автоматизированной системы управления производством комбикормов и премиксов // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 2 (27). С. 287–293.
- 12 Припоров И.Е. Цифровые технологии в приготовлении кормов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (87). С. 145–148.


- 13 Zarkadas L.N., Wiseman J. Influence of processing variables during micronization of wheat on starch structure and subsequent performance and digestibility in weaned piglets fed wheat-based diets // *Animal Feed Science and Technology*. 2001. Vol. 93. P. 93–107. doi: 10.1016/S0377-8401(01)00266-8
- 14 Монох С.И., Панченко Л.Ю., Цхведиани А.И. Способы очистки и обогащения газа, полученного в биогазовой установке // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2017. № 5 (127). С. 115–122.
- 15 Василенко В.Н., Фролова Л.Н., Драган И.В., Кочкин И.Ю. и др. Снижение углеродного следа перерабатывающей промышленности с помощью теплонасосного оборудования // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2023. № 1. С. 151–156.
- 16 Василенко В.Н., Шевцов А.А., Фролова Л.Н., Драган И.В. и др. Пароэжекторный тепловой насос как источник альтернативной энергии в технологиях пищевой промышленности // Вестник ЮУрГУ. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2022. № 2 (10). С. 34–42.
- 17 Шевцов А.А., Бунин Е.С., Ткач В.В., Сердюкова Н.А. и др. Эффективное внедрение парокомпрессионного теплового насоса в линию комплексной переработки семян масличных культур // Хранение и переработка сельхозсырья. 2018. № 1. С. 60–64.
- 18 Yoshida K., Shimizu N. Biogas production management systems with model predictive control of anaerobic digestion processes // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 43. P. 2189–2199. doi: 10.1007/s00449-020-02404-7
- 19 Schroer H.W., Just C.L. Feature engineering and supervised machine learning to forecast biogas production during municipal anaerobic co-digestion // *ACS ES&T Engineering*. 2024. Vol. 4. No. 3. P. 638–649. doi: 10.1021/acsestengg.3c00435
- 20 Ouderji Z.H., Heikkinen J., Luoranen M. et al. Energy, exergy and economic analysis of an integrated ground source heat pump and anaerobic digestion system for co-generation of heating, cooling and biogas // *Energy*. 2023. Vol. 283. Article 129106. doi: 10.1016/j.energy.2023.129106
- 21 Okoro-Shekwaga C.K., Braga Nan M., Ross A.B. et al. Energy and exergy analysis of biogas-powered power plant from anaerobic co-digestion of food and animal waste // *Processes*. 2022. Vol. 10. No. 5. Article 871. doi: 10.3390/pr10050871
- 22 Cattaneo C.R., Muñoz R., Korshin G.V., Naddeo V. et al. Biological desulfurization of biogas: a comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies // *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 893. Article 164689. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164689
- 23 Almenglo F., González-Cortés J.J., Ramírez M., Cantero D. Recent advances in biological technologies for anoxic biogas desulfurization // *Chemosphere*. 2023. Vol. 321. Article 138084. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138084
- 24 Sabitov A., Ostrikov A.N. et al. A research review on coarse grain micronization // *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 371. Article 03073. doi: 10.1051/e3sconf/202337103073
- 25 Khoza M., Kayitesi E., Workneh T.S. Functional properties and in vitro starch digestibility of infrared-treated (micronized) green banana flour // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2023. Vol. 103. No. 10. P. 4772–4781. doi: 10.1002/jsfa.12511


### References


- 1 Zhakova K.I., Mironova N.P. Modern trends in the development of food production technologies. *Food Industry: Science and Technology*. 2022. pp. 6–12. (in Russian).
- 2 Lumin A. Biogas technologies – a new trend of the circular economy. *EcoStandard.journal*. 2023. Available at: <https://journal.ecostandard.ru> (accessed: 11.06.2026) (in Russian).
- 3 Kulagin V.A., Dunaeva N.V., Yakovleva D.D. New technologies for using biogas as a way to solve environmental problems. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2021. vol. 91. no. 1. pp. 87–102. (in Russian).
- 4 Vandyshva M.S., Martyanichev A.V., Obolensky N.V. Method for producing biogas and fertilizer. *Karelian Scientific Journal*. 2015. no. 1. pp. 157–159. (in Russian).
- 5 Zaripov Sh.S. Biogas as an alternative energy source for the Republic of Tajikistan. In: *Introduction to Energy: Collection of materials of the II All-Russian (with international participation) Youth Scientific and Practical Conference*. 2016. p. 61. (in Russian).
- 6 Zebzeev G.Z. Biogas as a renewable energy resource of agro-industrial technologies. In: *Science. Technologies. Innovations: Collection of scientific works*. 2017. pp. 203–206. (in Russian).
- 7 Patent no. 2742058 RF, IPC A23K 10/30, A23K 40/00. Combined technological line for the production of micronized flakes for starter and pre-starter compound feeds for young farm animals using purified biogas. Afanasyev V.A., Ostrikov A.N., Shevtsov A.A., Teryokhina A.V., Nesterov D.A., Bogomolov I.S.; applicant and patent holder JSC "SPC "VNIKP". no. 2020101243; filed 10.01.2020; publ. 02.02.2021. Bull. no. 4. (in Russian).
- 8 Patent no. 2765578 RF, IPC A23N 17/00. Line for the production of complete compound feeds using biogas. Vasilenko V.N., Frolova L.N., Mikhailova N.A., Dragan I.V., Zhiltsova S.I.; applicant and patent holder VSUET. no. 2021105622; filed 16.04.2021; publ. 01.02.2022. Bull. no. 4. (in Russian).
- 9 Patent no. 2797234 C1 RF, IPC A23K 40/00, A23N 17/00. Method for producing complete compound feeds using biogas and installation for its implementation. Shevtsov A.A., Vasilenko V.N., Frolova L.N., Dragan I.V., Eremin I.D., Kochkin I.Yu.; applicant and patent holder VSUET. no. 2022127131; filed 19.10.2022; publ. 01.06.2023. Bull. no. 16. (in Russian).
- 10 Patent no. 2832084 C1 RF, IPC A23N 17/00. Method for controlling the technology of obtaining complete compound feeds using biogas. Shevtsov A.A., Vasilenko V.N., Frolova L.N., Kocharyan A.G., Eremin I.D., Markova V.S.; applicant and patent holder VSUET. no. 2024103468; filed 13.02.2024; publ. 19.12.2024. Bull. no. 35. (in Russian).
- 11 Kiktev N.A. Research and development of a set of technical means for an automated control system for the production of compound feeds and premixes. *Innovations in Agriculture*. 2018. no. 2 (27). pp. 287–293. (in Russian).
- 12 Priporov I.E. Digital technologies in feed preparation. *Bulletin of the Orenburg State Agrarian University*. 2021. no. 1 (87). pp. 145–148. (in Russian).
- 13 Zarkadas L.N., Wiseman J. Influence of processing variables during micronization of wheat on starch structure and subsequent performance and digestibility in weaned piglets fed wheat-based diets. *Animal Feed Science and Technology*. 2001. vol. 93. pp. 93–107. doi: 10.1016/S0377-8401(01)00266-8.
- 14 Monakh S.I., Panchenko L.Yu., Tskhvediani A.I. Methods of purification and enrichment of gas obtained in a biogas plant. *Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2017. no. 5 (127). pp. 115–122. (in Russian).
- 15 Vasilenko V.N., Frolova L.N., Dragan I.V., Kochkin I.Yu. et al. Reducing the carbon footprint of the processing industry using heat pump equipment. *Technologies of Food and Processing Industry of the Agro-Industrial Complex – Healthy Food Products*. 2023. no. 1. pp. 151–156. (in Russian).


- 16 Vasilenko V.N., Shevtsov A.A., Frolova L.N., Dragan I.V. et al. Steam-jet heat pump as a source of alternative energy in food industry technologies. Bulletin of SUSU. Series: Food and Biotechnology. 2022. no. 2 (10). pp. 34–42. (in Russian).
- 17 Shevtsov A.A., Bunin E.S., Tkach V.V., Serdyukova N.A. et al. Effective implementation of a vapor compression heat pump in the line for complex processing of oilseeds. Storage and Processing of Agricultural Raw Materials. 2018. no. 1. pp. 60–64. (in Russian).
- 18 Yoshida K., Shimizu N. Biogas production management systems with model predictive control of anaerobic digestion processes. Bioprocess and Biosystems Engineering. 2020. vol. 43. pp. 2189–2199. doi: 10.1007/s00449-020-02404-7.
- 19 Schroer H.W., Just C.L. Feature engineering and supervised machine learning to forecast biogas production during municipal anaerobic co-digestion. ACS ES&T Engineering. 2024. vol. 4. no. 3. pp. 638–649. doi: 10.1021/acsestengg.3c00435.
- 20 Ouderji Z.H., Heikkinen J., Luoranen M. et al. Energy, exergy and economic analysis of an integrated ground source heat pump and anaerobic digestion system for co-generation of heating, cooling and biogas. Energy. 2023. vol. 283. Article 129106. doi: 10.1016/j.energy.2023.129106.
- 21 Okoro-Shekwaga C.K., Braga Nan M., Ross A.B. et al. Energy and exergy analysis of biogas-powered power plant from anaerobic co-digestion of food and animal waste. Processes. 2022. vol. 10. no. 5. article 871. doi: 10.3390/pr10050871.
- 22 Cattaneo C.R., Muñoz R., Korshin G.V., Naddeo V. et al. Biological desulfurization of biogas: a comprehensive review on sulfide microbial metabolism and treatment biotechnologies. Science of the Total Environment. 2023. vol. 893. Article 164689. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.164689.
- 23 Almenglo F., González-Cortés J.J., Ramírez M., Cantero D. Recent advances in biological technologies for anoxic biogas desulfurization. Chemosphere. 2023. vol. 321. article 138084. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138084.
- 24 Sabitov A., Ostrikov A.N. et al. A research review on coarse grain micronization. E3S Web of Conferences. 2023. vol. 371. article 03073. doi: 10.1051/e3sconf/202337103073.
- 25 Khoza M., Kayites E., Workneh T.S. Functional properties and in vitro starch digestibility of infrared-treated (micronized) green banana flour. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2023. vol. 103. no. 10. pp. 4772–4781. doi: 10.1002/jsfa.12511.


### Сведения об авторах


**Виталий Н. Василенко** д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-mapp@vsuet.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-1547-9814>

**Ирина С. Юрова** к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yurova\_ira83@mail.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-5024-5888>

**Максим В. Копылов** д.т.н., профессор, кафедра технологии жиров, процессов и аппаратов химических и пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kopylov-maks@yandex.ru  
 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

**Эдуард Ю. Реветнев** аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-mapp@vsuet.ru  
 <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Артем Г. Кочарьян** аспирант, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kaf-mapp@vsuet.ru  
 <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Даниил Р. Кулигин** студент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет пищевых производств, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, kuligin470@gmail.com  
 <https://orcid.org/0009-0007-3133-4467>


### Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат


### Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.


### Information about authors


**Vitalii N. Vasilenko** Doc. Sci. (Engin.), professor, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-mapp@vsuet.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-1547-9814>

**Irina S. Yurova** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yurova\_ira83@mail.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-5024-5888>

**Maxim V. Kopylov** Dr. Sci. (Engin.), professor, technology of ats, processes and equipment for chemical and food production department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kopylov-maks@yandex.ru  
 <https://orcid.org/0000-0003-2678-2613>

**Eduard Yu. Revetnev** graduate student, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-mapp@vsuet.ru  
 <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Artem G. Kocharyan** graduate student, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-mapp@vsuet.ru  
 <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

**Daniil R. Kuligin** student, food processing machines and apparatuses department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kuligin470@gmail.com  
 <https://orcid.org/0009-0007-3133-4467>

### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

<b>Поступила</b> 01/04/2026	<b>После редакции</b> 18/04/2026	<b>Принята в печать</b> 10/05/2026
<b>Received</b> 01/04/2026	<b>Accepted in revised</b> 18/04/2026	<b>Accepted</b> 10/05/2026