

На правах рукописи

Недилько Илья Владимирович

**СЕЛЕКТИВНЫЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ГАЗОВОГО
СОСТАВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ
В ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЯХ**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата
технических наук**

Барнаул – 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук,
Воробьев Николай Павлович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Иванов Геннадий Яковлевич
кандидат технических наук, доцент
Меновщиков Юрий Александрович

Ведущая организация: ФГОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита диссертации состоится «24» июня 2011 года в 10-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс (8-3852) 36 71 29, <http://www.altstu.ru>; ntsc@desert.secna.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «19» мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета,
д.т.н., профессор



КУЛИКОВА Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В воздушной среде животноводческих помещений, предназначенных для выращивания и содержания крупного рогатого скота (КРС) и свиней, обычно присутствуют загрязнители (аммиак, углекислый газ, сероводород, окись углерода, окись азота и др.), которые оказывают вредное патологическое воздействие, что приводит к болезням и снижению продуктивности животных.

Аммиак в производственных помещениях для людей и животных является наиболее токсичным газом. Повышенное его содержание вызывает одышку, воспаление легких, поражение глаз, судороги, обморочное состояние, паралич дыхательного центра и даже смерть. Предельно допустимые концентрации (ПДК) аммиака в воздухе для свиней и молодняка крупного рогатого скота допускаются от 10 до 15 мг/м³ в зависимости от возраста животных. В помещениях с плохо работающей вентиляцией и канализацией содержание аммиака превышает ПДК в десятки раз. Поэтому контроль аммиака и других загрязнителей в животноводческих помещениях является одной из основных задач по поддержанию оптимального микроклимата для крупного рогатого скота и свиней, а также по созданию комфортных и безопасных условий для обслуживающего персонала.

Применяемые в настоящее время средства контроля вредных газов (флуоресцентные кулонометрические, кондуктометрические, термохимические, оптические, электрохимические, фотоионизационные) обладают нелинейной функцией преобразования, что ограничивает точность измерений, низкой временной стабильностью, снижающей воспроизводимость результатов, подвержены значительному влиянию внешних дестабилизирующих факторов (температуры, влажности, давления и др.), как правило, требуют отбора проб, обладают инерционностью при получении результатов измерений, сложны в эксплуатации. Помимо этого агрессивность среды способствует преждевременному выходу из строя чувствительных элементов используемых газоанализаторов.

Ультразвуковые приборы, в основном, лишены перечисленных недостатков. Они обладают высокими эксплуатационными характеристиками, возможностью дистанционного выноса датчиков и т.д. Однако их ограниченная селективность не позволяет одновременно контролировать наличие вредных газовых примесей на уровне ПДК, тем самым осуществлять автоматический мониторинг параметров воздушной среды для управления микроклиматом животноводческих помещений. Представляется также важным обеспечение излучения и приема акустических импульсов без изменения их формы в условиях наличия защитных мембран, независимости измерений от возмущающих воздействий, высокой точности и помехоустойчивости измерений.

Возникшее противоречие между недостаточными санитарно-гигиеническими условиями содержания животных и современными требова-

ниями к обеспечению экологической безопасности среды в помещениях устраняется с помощью создания системы ультразвукового селективного автоматического мониторинга.

Работа выполнена в соответствии с «Концепцией энергетического обеспечения сельскохозяйственного производства в условиях многоукладной экономики (РАСХН)» и «Концепцией автоматизации технологических процессов сельскохозяйственного производства на период до 2010 года».

Целью работы является улучшение условий содержания животных в производственных помещениях и условий труда персонала путем разработки и использования системы ультразвукового контроля газового состава воздушной среды, обеспечивающей снижение содержания вредных газов до уровня, не превышающего ПДК.

Идея работы состоит в совмещении функций селективного мониторинга вредных газовых примесей и автоматического снижения их концентраций, обеспечивающего экологическую безопасность.

Для достижения поставленной цели необходимо решение **следующих задач:**

1. Провести анализ современных средств контроля газовых загрязнений в животноводческих помещениях.
2. Обосновать требования к устройству ультразвукового селективного контроля газового состава среды в помещениях.
3. Провести анализ и синтез структуры ультразвукового прибора.
4. Разработать метод имитационного моделирования и проектирования системы автоматического мониторинга газовых примесей и их параметров в животноводческих помещениях.
5. Провести экспериментальное исследование опытного образца разработанного ультразвукового устройства и дать технико-экономическую оценку эффективности.

Объект исследования. Системы контроля газового состава воздушной среды в животноводческих помещениях.

Предмет исследования. Электроакустические процессы контроля газового состава воздушной среды и физические явления распространения в ней ультразвуковых колебаний.

Методы исследования. Методы линейной и нелинейной акустики, теория вероятностей и математическая статистика, анализ и синтез передаточных функций пьезоэлектрических преобразователей, имитационное моделирование, методы группового выбора и экспертных оценок теории систем, теории инвариантности и автоматического управления.

Научную новизну представляют:

- метод имитационного моделирования и проектирования пьезоэлектрических преобразователей и индикатора наличия вредных веществ в воздушной среде;

- аналитические зависимости концентрации вредных газов от молекулярной массы смеси воздуха.

Практическую ценность работы представляют:

- методика расчета ультразвукового устройства контроля газового состава.
- ультразвуковая аппаратура, позволяющая обеспечить автоматический селективный мониторинг вредных газовых примесей и улучшить состояние воздушной среды в животноводческих помещениях путем регулирования параметров микроклимата.

Реализация результатов работы:

Разработанный ультразвуковой прибор прошел производственные испытания и внедрен в ЗАО «Лебяжье» Егорьевского района Алтайского края на животноводческой ферме крупного рогатого скота. Методические рекомендации «Система ультразвукового контроля газового состава воздушной среды животноводческих помещений» одобрены Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края и приняты для практического использования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на 5-й и 6-й всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь" (НиМ – 2009), (НиМ - 2009); V международной научно-практической конференции «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера – приоритетные направления обеспечения социальной безопасности населения юга Западной Сибири. Комплексная безопасность и антитеррористическая защищенность региона на примере Алтайского края» г. Барнаул, 7 декабря 2007; III международной научно-практической конференции (25-27 июня 2008 г.). – Улан-Удэ; VI международной научно-практической Интернет-конференции " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 01 февраля по 30 апреля 2008 г. и международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» 26-30 июня 2009 г. – Новосибирск, 2009.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Метод автоматического ультразвукового селективного контроля вредных веществ в воздухе животноводческих помещений.
2. Результаты имитационного моделирования электроакустических процессов контроля газового состава и физических явлений распространения ультразвуковых колебаний в воздушной среде.
3. Требования к устройству ультразвукового контроля газового состава воздушной среды на объектах.
4. Метод расчета и проектирования системы селективного автоматического мониторинга газового состава воздушной среды.

Публикации. По материалам диссертационных исследований опубликовано 15 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях по перечню ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и приложений.

Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 18 таблиц, 4 приложения. Список литературы включает 129 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены сведения об апробации основных результатов работы, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В первом разделе приведен анализ методов и средств контроля газового состава воздушной среды в животноводческих помещениях, дана их классификация и показаны перспективы применения ультразвуковых приборов.

Известен экспресс-метод определения концентрации аммиака с использованием индикаторных порошков и специального оборудования. Из числа автоматических газоанализаторов применяются флуоресцентные кулонометрические и кондуктометрические. Однако эти приборы обладают существенной зависимостью выходного сигнала преобразователя от влажности анализируемого газа, ограниченной селективностью, необходимостью в частой замене электролита, нелинейности функции преобразования и т.д.

Современным технологическим требованиям контроля газового состава в целом соответствует ультразвуковая аппаратура, обладающая высокой надежностью и простотой обслуживания. Вместе с тем, используемые в настоящее время в сельском хозяйстве ультразвуковые приборы не позволяют регулировать газовый состав воздушной среды в животноводческих помещениях. Это обусловлено тем, что информации о скорости ультразвука в среде недостаточно для контроля нескольких вредных газов, появление которых обусловлено технологическими и биологическими процессами, происходящими в животноводческих помещениях. Кроме того, скорость распространения колебаний в газовых средах, регистрируемая ими, зависит от температуры и влажности. Применяемые в сельском хозяйстве газоанализаторы обладают низкой точностью при измерении скорости и коэффициента затухания акустических колебаний в газах.

При выборе метода контроля вредных газовых примесей необходимо оценить технические характеристики (чувствительность, разрешающую способность, достоверность результатов контроля и надежность измерительной аппаратуры).

Выполненные в диссертации исследования позволили определить основные направления совершенствования ультразвуковой диагностики газового состава загрязнителей в животноводческих помещениях. Наиболее перспективным из числа известных методов ультразвукового контроля является метод, основанный на измерении скорости акустической волны, распространяемой в газовой среде. Суть этого метода заключается в формировании пьезоизлучателем короткого импульса, скорость распространения которого связана с содержанием отдельных загрязнителей в воздушной среде помещений.

В работе дано обоснование метода автоматизированного сбора данных о газовом составе среды, селекции отдельных ее компонентов, контроля содержания вредных компонентов и сравнения их с ПДК с целью регулирования параметров микроклимата животноводческих объектов.

Второй раздел посвящен обоснованию требований к устройству ультразвукового контроля (УУЗК) газового состава воздушной среды.

Рассмотренное в диссертации УУЗК сочетает в себе функции индикации наличия вредных веществ, содержащихся в животноводческих помещениях на уровне ПДК, и выработки сигнала управления для автоматического включения приточно-вытяжной вентиляции с целью улучшения экологической обстановки в производственном помещении.

В диссертации изложена методика контроля газовых примесей и определена топологическая схема измерения параметров микроклимата в животноводческих помещениях.

Скорость ультразвука в газовой среде зависит от отдельных ее компонентов (вредных примесей) и от их концентраций. Исходя из этого при обосновании метрологических требований к УУЗК получена зависимость минимально обнаруживаемой концентрации загрязнителя в воздухе m_i (г/м³) от относительной погрешности измерения скорости ультразвука δ (при температуре T °K)

$$m_i = (2\delta M_0(0,013T^2 - 12T + 3600)) \times (2\delta M_i - 2\delta M_0 + M_i + M_0)^{-1} \quad (1)$$

где M_0 и M_i - молекулярные массы сухого атмосферного воздуха и загрязнителя.

С учетом формулы (1) в работе сформулированы требования к точности измерения скорости ультразвука в зависимости от параметров определяемого газа (ПДК – предельно (максимально) допустимой концентрации и M_i). Полученная зависимость (рисунок 1) позволяет обосновать аппаратное значение δ для любого из перечисленных компонентов газовой среды и минимально обнаруживаемые концентрации загрязнителя.

Будем рассматривать атмосферный воздух при отсутствии загрязнителей как устойчивую систему, содержащую один газовый компонент, а при наличии примесей – некоторую псевдобинарную газовую смесь. Тогда возможные загрязнители (аммиак, углекислый газ и т.д.) представим как множество Z , каждый элемент которого ставится в соответствие с некоторым физически реализуемым критерием K , характерным для всех газообразных веществ. Тогда выражение

$$X(K) \in Z \quad (2)$$

обозначает принадлежность загрязнителей или их группы X , обладающих критерием K , всему множеству Z . В соответствии с методом экспертных оценок теории систем произведено упорядочивание распределения загрязнителей. С

этой целью предельно допустимые концентрации рабочей зоны (ПДКрз) загрязнителей использованы в качестве критерия идентификации наряду с K .

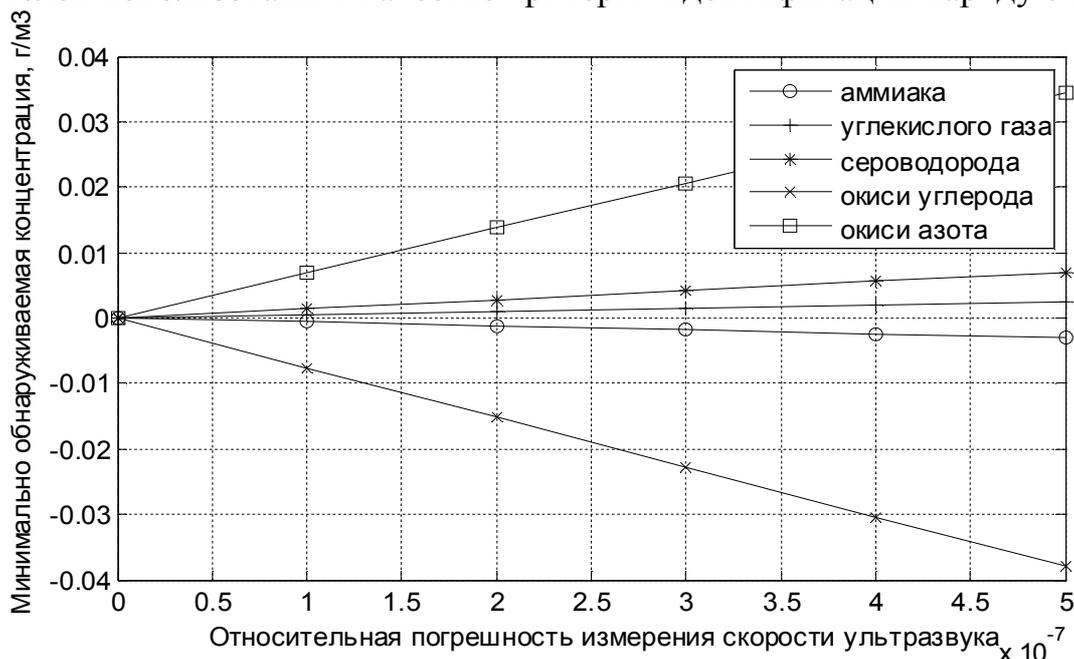


Рис. 1. Зависимость минимально обнаруживаемой концентрации вредных веществ в воздухе m_i , (г/м³) от относительной погрешности измерения скорости звука δ (при температуре 283 °K)

Это позволило поставить компоненты загрязнителей в соответствие множеству Z , упорядоченному по критериям K и ПДКрз, то есть множеству Z'

$$X(K, P_{DK}) \in Z' \in Z, \quad (3)$$

где P_{DK} - ПДКрз.

Выражение (3) эквивалентно интегральной идентификации компонентов газообразных сред, осуществляемой на основе физического (K) и нефизического (ПДКрз) критериев и упорядоченного по этим критериям множества Z' .

В качестве критерия K принята молекулярная масса M_{CM} псевдобинарной смеси воздуха и вредных газов. Примем, что молекулярная масса сухого атмосферного воздуха равна M_0 , а максимальное отклонение от номинального значения (вследствие естественных флуктуаций концентраций компонентов сухого атмосферного воздуха) равно ΔM_0 . Тогда можно получить оценку $\Delta M_0 / M_0$ на уровне 1×10^{-7} с вероятностью 97%. Поэтому следует ожидать, что с такой же относительной погрешностью может быть определена концентрация загрязнителя воздушной среды по измерению M_{CM} .

Для обеспечения селективности ультразвукового анализа газообразных сред по скорости ультразвука в диссертации предложен следующий алгоритм.

Предварительно все множество возможных загрязнителей располагают в одномерный ряд по возрастанию степени влияния каждого на изменение молекулярной массы анализируемой смеси при условии достижения ими некоторого

характерного для каждого из них порогового значения концентрации (например, ПДКрз).

Одновременно устанавливают однозначное соответствие между элементами ряда и изменением молекулярной массы газовой смеси (воздуха).

По измеренной величине молекулярной массы и по элементам ряда определяются группы загрязнителей и их концентрации.

Для составления соответствия между значениями молекулярной массы смеси воздуха, ПДКрз вредных газов и наименованиями групп вредных веществ, для которых возможно превышение ПДКрз или некоторого порогового уровня концентрации, получено соотношение

$$M_{см} = M_0 + 224 \cdot 10^{-7} \cdot П_{ок} \cdot (M_i - M_0) \cdot M_i^{-1}, \quad (4)$$

где $M_0=28,996$ (молекулярная масса сухого атмосферного воздуха), M_i - молекулярная масса загрязнителя, $П_{ок}$ - ПДКрз.

На рисунке 2 приведена зависимость, реализующая формулу (4), с помощью которой можно определить значения $M_{см}$ по известным M_i и ПДКрз для любого газового загрязнителя.

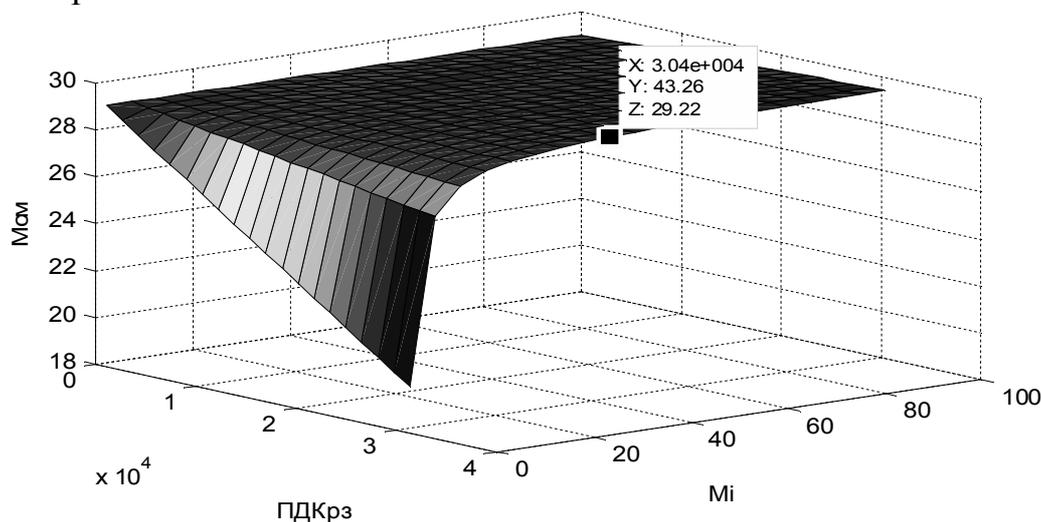


Рис. 2. Зависимость молекулярной массы $M_{см}$ воздушной смеси от ПДКрз ($\text{мг}/\text{м}^3$) и от молекулярной массы M_i загрязнителя

Анализ таблицы 1 позволяет установить предельные возможности контроля группы загрязнителей в воздухе по скорости ультразвука при принятых значениях δ .

Установлено, что наиболее высокие требования к относительной погрешности измерения скорости ультразвука δ возникают при контроле сероводорода (минимально обнаруживаемая концентрация этого газа $0,007 \text{ г}/\text{м}^3$ ($P=0,3$) при ПДКрз, равной $0,02 \text{ г}/\text{м}^3$). При этом контроль окисей углерода и азота становится проблематичным, т.к. минимально обнаруживаемые концентрации этих газов ($0,038 \text{ г}/\text{м}^3$ и $0,034 \text{ г}/\text{м}^3$) больше соответствующих ПДКрз ($0,02 \text{ г}/\text{м}^3$ и $0,03 \text{ г}/\text{м}^3$).

Таблица 1

Расчетные значения минимально обнаруживаемых концентраций вредных газов

Вредный газ	M_i , о.м.м	$\Pi_{\text{ок}}^*$ $г/м^3$	$M_{\text{см}}$, о.м.м	m_i при $\delta = 1 \times 10^{-5}$	m_i при $\delta = 1 \times 10^{-6}$	m_i при $\delta = 1 \times 10^{-7}$
				$г/м^3$	$г/м^3$	$г/м^3$
Аммиак	17,032	0,02	28,99568	0,06 $P = 0$	0,006 $P = 0,7$	0,003 $P = 0,85$
Углекислый газ	44,00995	4,94	29,03375	0,05 $P = 0,99$	0,005 $P = 0,99$	0,0024 $P = 0,99$
Сероводород	34,082	0,01	28,99603	0,14 $P = 0$	0,014 $P = 0$	0,007 $P = 0,3$
Окись углерода	28,01	0,02	28,99598	0,76 $P = 0$	0,076 $P = 0$	0,038 $P = 0$
Окись азота	30,008	0,03	28,99602	0,7 $P = 0$	0,07 $P = 0$	0,034 $P = 0$

Примечание: m_i - минимально обнаруживаемая концентрация загрязнителя при заданных значениях δ и P ; M_i - молекулярная масса загрязнителя; $M_{\text{см}}$ - молекулярная масса воздушной смеси; δ - относительная погрешность измерения скорости ультразвука; P - вероятность обнаружения загрязнителя; $\Pi_{\text{ок}}$ - ПДКрз – предельно допустимая концентрация в рабочей зоне; * - или максимальное содержание

Вероятность P обнаружения загрязнителя на фоне сухого атмосферного воздуха в принятых границах ПДКрз или максимального содержания загрязнителя в воздухе определена исходя из того, что

$$P = 1 - |m_i| \cdot \Pi_{\text{ок}}^{-1} \quad (5)$$

при том, что при выполнении условия $|m_i| > \Pi_{\text{ок}}$ соответствующие значения $P = 0$.

При этом $\delta = 5 \times 10^{-7}$ характеризует максимальную погрешность при измерении аммиака, углекислого газа и сероводорода в воздухе по скорости ультразвука при вероятности, соответственно, 0,85, 0,99, 0,3.

Анализ требований к преобразователям акустической информации в части повышения точности и чувствительности показал, что при частотно-импульсных измерениях скорости ультразвука в газовых средах наиболее целесообразно использовать известный (Земельман И.А.) метод автоматической коррекции погрешностей измерительного устройства (ИУ) по способу вспомогательных измерений с системой автоматического введения поправок. При этом предполагается, что погрешность от случайных собственных изменений параметров статической функции преобразования ИУ может быть уменьшена с помощью соответствующей модернизации частотно-импульсного метода измерения скорости ультразвука.

В диссертации дана оценка погрешности метода вспомогательных измерений с учетом температурного фактора, как наиболее возмущающего. В качестве входной величины примем отклонение средней молекулярной массы воздуха ΔM , а выходной величины - частоту автоциркуляции синхроимпульсов с учетом возможности ее линеаризации.

Примем, что частота автоциркуляции кратна величине средней молекулярной массы воздуха и номинальный коэффициент преобразования линеен. Вместе с тем влияние температуры вносит значительную погрешность при измерении. Поэтому отклонение температуры от номинального значения на 10°C можно интерпретировать как изменение статической функции преобразования на 1,65 %. В этом случае относительное квадратичное отклонение функции будет равно 0,005 %.

Примем погрешность измерения температуры, равной 10^{-6} , а температурный диапазон - $10^\circ \text{C} \pm 30^\circ \text{C}$. Тогда максимальное отклонение температуры - $\xi_{\max} = 60^\circ \text{C}$. В результате вычислений (по методике Земельмана И.А.) получим максимальную статическую погрешность преобразования вида

$$\Delta_{\text{к.ст.}} = 0,3 \cdot 10^{-7} + 0,3 \cdot 10^{-5} \% \cdot \Delta M \quad (6)$$

При отсутствии коррекции приведенная к входу погрешность преобразования определится в виде

$$\Delta = 0,015 + 1,5 \% \cdot \Delta M \quad (7)$$

В диссертации дана оценка динамической погрешности метода вспомогательных измерений при коррекции температурных возмущений. Продолжительность вычисления поправки в счетном устройстве газоанализатора принята равной 100 с. При этом динамическая погрешность коррекции

$$\Delta_{\text{к.д.}}(t) = 0,4 \cdot 10^{-7} + 0,4 \cdot 10^{-5} \% \cdot \Delta M \quad (8)$$

Полная погрешность коррекции от температуры

$$\Delta_{\text{к.}} = \Delta_{\text{к.ст.}}(t) + \Delta_{\text{к.д.}}(t) = 0,7 \cdot 10^{-7} + 0,7 \cdot 10^{-5} \% \cdot \Delta M \quad (9)$$

Таким образом, УУЗК, построенное по принципу вспомогательных измерений, обладает инвариантностью по отношению к температурным возмущениям, достаточной для обнаружения вредных веществ в воздухе животноводческих помещений.

В таблице 2 приведены требования к УУЗК воздушной среды в животноводческих помещениях.

Требования к УУЗК воздушной среды в животноводческих помещениях

Функциональные	Автоматический режим работы
	Селективность определения загрязнителей в рабочей зоне
	Загрязнители: аммиак, углекислый газ, сероводород
	Способ отбора пробы - принудительный
	Возможность контроля вредных газов в 9 точках
Метрологические	Диапазон изменения значений контролируемого параметра - относительной молекулярной массы воздушной среды (о.м.м.): от значения, соответствующего 2ПДК _{крз} аммиака, до ПДК _{крз} углекислого газа (для производственных помещений)
	Погрешность измерения параметра (о.м.м.) до значения, эквивалентного присутствию $\pm 0,4$ ПДК _{крз} сероводорода
	Минимальная вероятность обнаружения наименее значимого (по влиянию на о.м.м) загрязнителя (сероводорода): $P = 0,3$
	Номинальное время установления показаний: 100 с
Конструкционные	Индикатор наличия вредных веществ
	Блок формирования сигнала для автоматического включения приточно-вытяжной вентиляции
	Тип газоанализатора: стационарный
	Выносной датчик на кабеле длиной: 100 м
	Масса прибора не более: 3 кг
	Габаритные размеры прибора: не более: 360x360x155 мм
Электротехнические	Потребляемая прибором мощность не более: 15 Вт
	Напряжение питания: 220 \pm 22 В, 50 \pm 1 Гц
	Нагрузочная способность реле, управляющего включением (отключением) приточно-вытяжной вентиляции: 7А при 220В
Эксплуатационные	Температура воздуха: от - 20 до + 40 °С
	Относительная влажность (без конденсации влаги) от 10 до 95 %
	Атмосферное давление: от 84 до 106 кПа
	Режим работы: круглосуточный

Реализация изложенного метода по измеренным значениям $M_{см}$ в комплексе газовых загрязнителей производственной среды дает возможность автоматически управлять приточно-вытяжной вентиляцией. Это позволяет значительно минимизировать капитальные и эксплуатационные расходы на проведение мониторинга воздушной среды в животноводческих помещениях, снизить содержание вредных газов ниже ПДК_{крз}, тем самым обеспечить нормальные санитарно-гигиенические условия содержания животных.

В третьем разделе представлены результаты имитационного моделирования и разработки УУЗК.

Цель моделирования – построение амплитудно- и фазочастотных характеристик пьезоэлектрических преобразователей, формирование структуры УУЗК,

оценка линейности и диапазона его показаний при изменении концентрации газов, оценка уровня инвариантности работы устройства от воздействия возмущающих факторов.

Основным блоком ультразвукового прибора является пьезопреобразователь. Известные аналитические методы расчета преобразователей базируются на нелинейных электромеханических аналогиях, для которых отсутствует математическая постановка и решение задачи, например, при отыскании обратного преобразования Лапласа.

Это осложняет использование акустических методов контроля газовых примесей и создание эффективной системы мониторинга и управления микроклиматом. При моделировании системы ультразвукового контроля в диссертации использованы работы В.И. Домаркаса и Р.-И.С. Кажиса по анализу и синтезу передаточных функций пьезоэлектрических преобразователей.

Рассмотрим общий случай расчета механически демпфированного излучателя с произвольным числом переходных слоев и электрической цепью включения генератора. В этом случае передаточная функция излучателя системы «преобразователь - электрическая цепь» Г- типа может быть представлена в виде

$$K_{II}(x) = K_{II0} \times \Phi_{II}(x) e^{j\varphi_{II}(x)}, \quad (10)$$

где K_{II0} - максимальный коэффициент передачи механически демпфированного пьезоизлучателя без переходного слоя, питаемого от генератора напряжения;

$\Phi_{II}(x)$ - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пьезоизлучателя, нормированная относительно максимального значения коэффициента передачи пьезоэлектрической пластинки;

$\varphi_{II}(x)$ - фазочастотная характеристика (ФЧХ) пьезопреобразователя;

x - относительная частота.

В свою очередь,

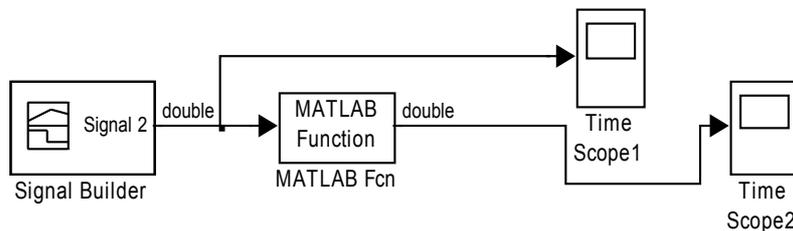
$$\Phi_{II}(x) = K_{II}(x) K_{II0}^{-1}, \quad (11)$$

где K_{II0} - максимальный коэффициент передачи механически недемпфированного пьезоизлучателя без переходного слоя, питаемого от генератора напряжения.

Функцию $\Phi_{II}(x)$ можно интерпретировать как кратность коэффициента передачи исследуемого преобразователя к величине K_{II0} на каждой относительной частоте x .

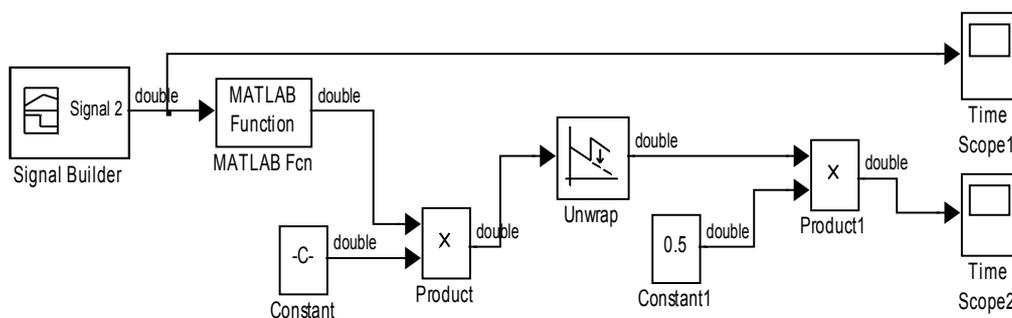
Поскольку коэффициент K_{II0} является действительной величиной, а зависимость частоты x (в интервале 0 - 2) во времени линейная, то проведенное

нормирование не меняет функцию $\varphi_{II}(x)$, являющуюся фазочастотной характеристикой (ФЧХ) преобразователя. На рисунках 3 и 4 приведены разработанные модели для получения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик пьезоизлучателя, нормированных относительно x .



Блоку MATLAB Fcn соответствует m-файл. Блоки Time Scope1 и Time Scope2 – осциллографы

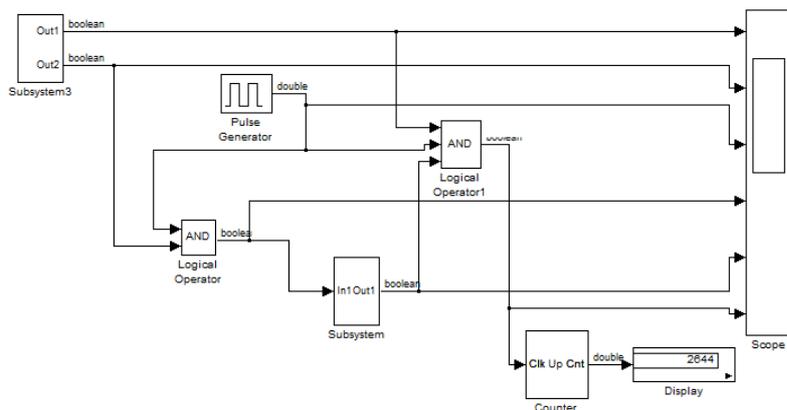
Рис. 3. Модель для получения амплитудно-частотной характеристики пьезоизлучателя



Блоку MATLAB Fcn соответствует m-файл

Рис. 4. Модель для получения фазочастотной характеристики пьезоизлучателя

Имитационная модель УУЗК. На стадии разработки УЗИК проведено моделирование блока получения информации о молекулярной массе воздушной среды (рисунок 5), а в таблице 3 – расчетные значения параметров модели, что



позволяет оценить отклонение показаний прибора при одновременном изменении временной задержки в эталонном и измерительном канале, то есть определить уровень инвариантности работы устройства.

Рис. 5. Модель устройства для косвенного измерения скорости ультразвука (по рисунку 6)

Таблица 3

Зависимость показаний прибора (y) от одновременного изменения временной задержки в эталонном и измерительном канале (τ в процентах от начального значения)

$\tau, \%$	100	120	140	160
y	2056	2063	2068	2049

На основании проведенного моделирования разработано УУЗК, структурно-функциональная схема которого приведена на рисунке 6.

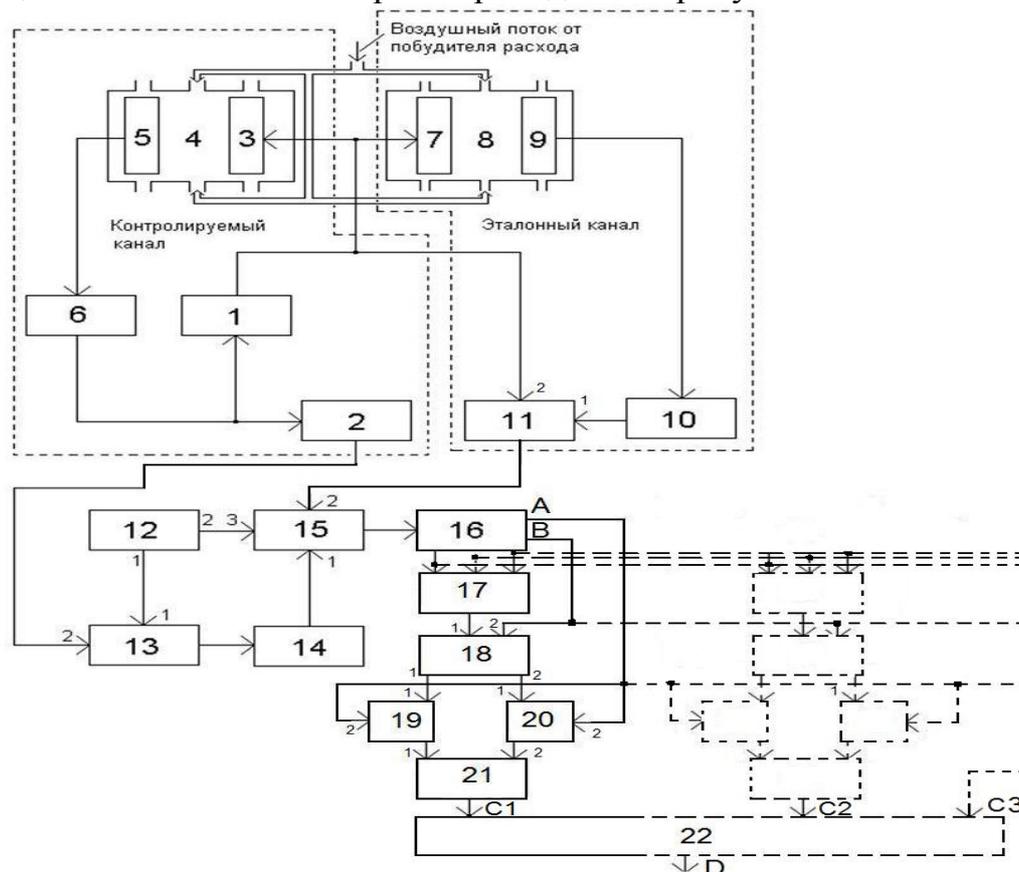


Рис. 6. Блок-схема устройства, реализующего способ регулирования газового состава воздушной среды:

Контролируемый канал автоциркуляции электроакустических импульсов: синхронизируемый генератор - 1, формирователь контрольного интервала - 2, излучатель - 3, контролируемая среда - 4, приемник - 5, усилительно-формирующий блок - 6; эталонный канал: излучатель - 7, эталонная среда - 8, приемник - 9, усилительно-формирующий блок - 10, формирователь эталонного интервала - 11; генератор стабильных колебаний - 12, каскад совпадений - 13, делитель частоты - 14, второй каскад совпадений - 15, счетчик импульсов - 16, дешифратор - 17, триггер - 18, двухвходовая схема «И» - 19, дополнительная двухвходовая схема «И» - 20, дополнительный триггер - 21, n-входовая схема «ИЛИ» - 22

Устройство, состоящее из блока получения информации о молекулярной массе воздушной среды и индикатора наличия вредных веществ, работает следующим образом. Генератор 1 вырабатывает электрические импульсы, которые после преобразования их в акустические проходят контролируемый канал и далее, преобразовываясь в электрические, поступают на вход генератора 1, вызывая повторный цикл автоциркуляции электроакустических импульсов. Эти же импульсы поступают на входы формирователя 2 и далее на каскады 13, управляя прохождением высокочастотных импульсов с периодом T_0 с выхода генератора 12 на вход делителя 14, имеющего коэффициент деления K_d . Результат измерений представляется в виде $N_X = K_d C_K C_Э^{-1}$, где C_K и $C_Э$ - скорость ультразвука соответственно в контролируемом и эталонном каналах, обеспечивая тем самым инвариантность показаний устройства с учетом температурного воздействия.

В устройстве предусмотрена компенсация влияния влажности на надежность его функционирования. Установлено, что минимальная постоянная времени изменения влажности атмосферного воздуха равна $\tau_в = 4000$ с. Постоянная времени $\tau_э$ воздухообмена эталонного канала выбрана равной 800 с, из условия качественной пятикратной продувки датчика. Контролируемый и эталонный каналы сообщаются с внешней средой и заполняются газом с определенным значением относительной влажности φ воздуха. Изменение частоты автоциркуляции в каналах при разных значениях φ описываются кривыми, близкими по характеру к мультипликативным воздействиям, которые компенсируются и не оказывают влияния на результат измерений.

При возникновении флуктуационных явлений наблюдается неоднозначность показаний приборов контроля (погрешность дискретности). С целью ее преодоления в диссертации рассмотрен метод, суть которого состоит в том, что в момент времени, когда общее число импульсов, заполняющих контрольные интервалы, достигает фиксированного значения, прекращается заполнение импульсами эталонных интервалов. При этом исключаются n -младшие разряды индикатора, определяемые соотношением:

$$n = \lg \left[m^{-1} \left(2l^{-1} t_u C \right)^{0,5} \right], \quad (12)$$

где n - порядок числа; m - мантисса числа; t_u - время счета; C - скорость звука в среде; l - расстояние между пьезопреобразователями в контролируемом канале.

Отмеченное позволяет повысить точность измерений скорости ультразвука (соответственно – молекулярной массы).

В течение интервала счета электрические импульсы, появляющиеся на разрядах счетчика 16, поступают на входы дешифратора 17, который предварительно настроен на селекцию числа, соответствующего максимальному изменению предельно допустимой концентрации вредного газа. Таким образом, появление импульсов на выходе дешифратора возможно только в случае дости-

жения или превышения заданного значения концентрации (ПДКрз) аммиака. На выходе триггера 21 формируется сигнал С1 о превышении одним из контролируемых компонентов газовой среды (например, аммиаком) ПДКрз, на выходе блока 22 формируется сигнал D для регулирования параметров микроклимата в животноводческом помещении.

Сигнализация о предельно допустимых концентрациях загрязнителей осуществляется с помощью разработанного электронного коммутатора измерительных каналов, входящего в состав УУЗК. Принцип его действия основан на использовании аналоговых устройств с цифровым управлением для коммутации измерительных каналов пьезоэлектрических преобразователей.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований и комплексная оценка эффективности мониторинга газового состава в животноводческих помещениях.

Программой исследования предусматривалось:

- проверка принятых теоретических предпосылок;
- определение диапазона и погрешности измерения молекулярной массы воздуха, а также уровня инвариантности при возмущающих воздействиях, влияющих на эффективность работы прибора;
- производственная проверка системы ультразвукового селективного автоматического мониторинга газовой среды.

При испытаниях разработанного индикатора наличия вредных газов в животноводческих помещениях определялись:

- X_{min} и X_{max} - нижнее и верхнее значения относительной молекулярной массы воздушной среды, о.м.м.;
- погрешность измерения относительной молекулярной массы воздушной среды при наличии концентрации аммиака, углекислого газа и сероводорода на уровне ПДКрз, о.м.м.;
- P - доверительная вероятность измерения относительной молекулярной массы воздушной среды;
- зависимость индекса молекулярной массы воздуха от времени при действии системы коррекции.

Принятые допущения: полученные данные при измерении молекулярной массы газов не подвергались дополнительной проверке по эталонным кривым, поскольку скорость ультразвука достаточно точно определяется расчетным путем.

При экспериментах использовалась следующая аппаратура: ДГСУ – динамическая газосмесительная установка, ротаметр РКС-1-0.25 (расход смеси 100 ± 25 мл/мин), ПГС №1 - поверочные газовые, смеси из баллонов под давлением, редуктор, вентиль точной регулировки, приспособления для поверки, термометр лабораторный 0-50 °С, комбинированный прибор Ц4317, психрометр ПВ1Б, секундомер СМ-60, побудитель расхода ПЗ.

С учетом технологических требований к скорости изменения контролируемого параметра и диапазону его изменения с учетом быстродействия самого

прибора и инерционности газосмесительной установки определялся оптимальный объем выборки.

Анализ результатов измерений:

- производился в пакетах Matlab с линеаризацией (с нормированием отклонения от линейной аппроксимации);

- для проверки на непротиворечие распределения генеральной совокупности значений нормальному закону с неопределенными параметрами применялся тест Лиллиефорса средствами Statistics Toolbox 5.0 среды Matlab;

- построение значений линейной модели и ее 87% доверительных интервалов осуществлялось функцией plot.

В результате испытаний индикатора наличия вредных веществ получена зависимость индекса молекулярной массы (при наличии аммиака на уровне ПДКрз) от времени (рисунок 7).

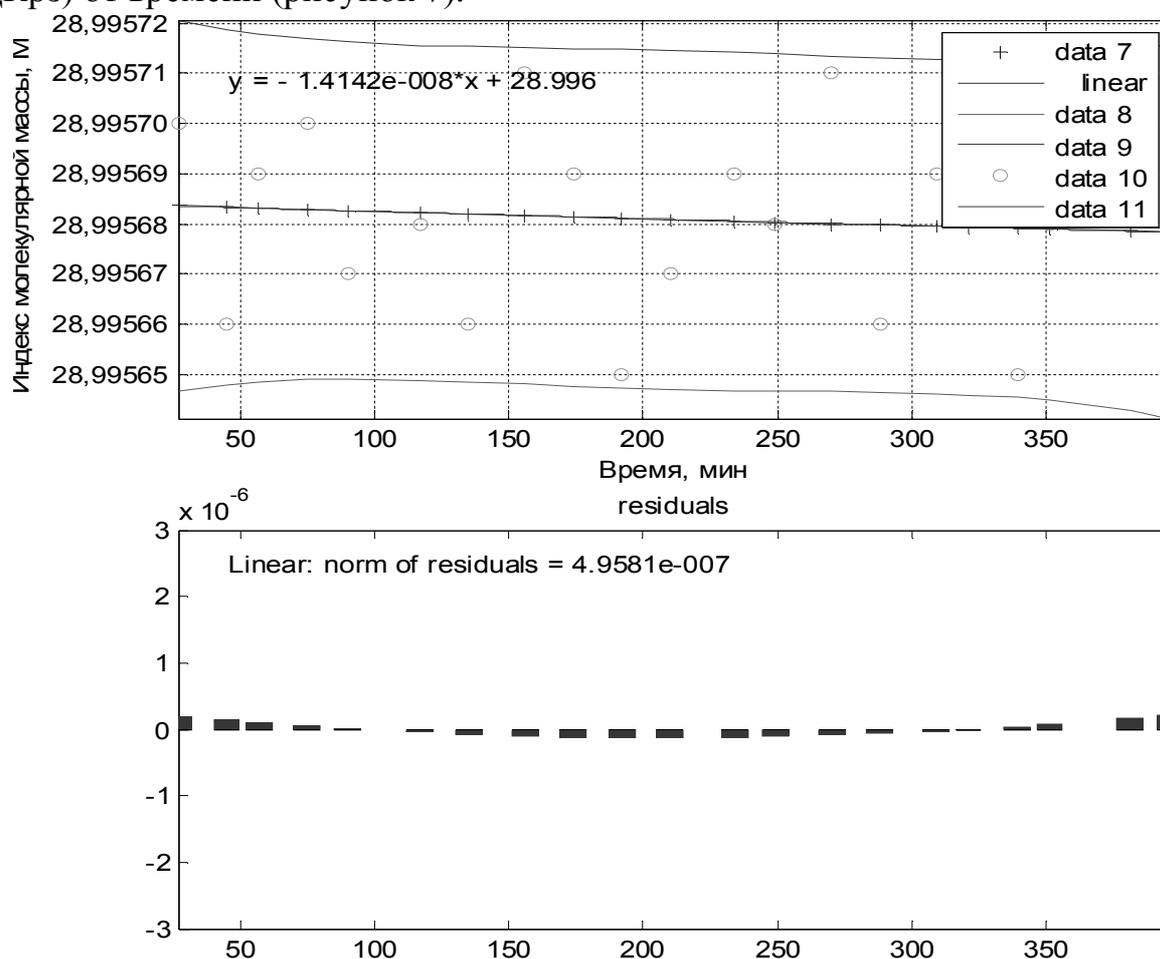


Рис. 7. Построение значений линейной модели и их 87% доверительных интервалов для индекса молекулярной массы воздуха (по аммиаку на уровне ПДКрз) от времени в диапазоне температур от -20 до +40 градусов Цельсия при действии системы коррекции в воздухе (ниже приведено нормированное отклонение графика от линейной аппроксимации)

Аналогичные зависимости получены и для индекса молекулярной массы при наличии углекислого газа и сероводорода на уровне ПДКрз.

В результате испытаний УУЗК установлено:

1. Диапазон измерения значений относительной молекулярной массы воздушной среды - $X_{min} = 28,9954$ о.м.м. и $X_{max} = 29,22525$ о.м.м.

2. Погрешность измерения относительной молекулярной массы воздушной среды составила $\pm 2,5 \cdot 10^{-7}$ о.м.м. при доверительной вероятности P , равной 87 % (по аммиаку), $\pm 1,5 \cdot 10^{-6}$ о.м.м. при доверительной вероятности P , равной 87 % (по углекислому газу), $\pm 1,7 \cdot 10^{-7}$ о.м.м. при доверительной вероятности P , равной 87 % (по сероводороду).

Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Разработанное УУЗК соответствует предъявленным техническим требованиям и способно осуществлять селективный контроль и индикацию наличия вредных газовых примесей (аммиака, углекислого газа, сероводорода).

2. Автоматический мониторинг вредных газовых примесей и система приточно-вытяжной вентиляции дают возможность понизить концентрацию этих примесей до значений, соответствующих санитарно-гигиеническим условиям содержания животных в помещениях.

В диссертации проведен расчет ожидаемого экономического эффекта от использования одного УУЗК применительно к животноводческому помещению на 100 голов КРС, который составил 72000 рублей в год.

Разработаны методические рекомендации «Система ультразвукового контроля газового состава воздушной среды животноводческих помещений», одобренные Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края и принятые для практического использования.

Основные выводы и результаты

1. Состояние воздушной среды в животноводческих помещениях не соответствует санитарно-гигиеническим нормам, что не обеспечивает безопасные условия содержания животных и труда персонала. Общим недостатком известных технических решений в области мониторинга воздушной среды в сельскохозяйственных помещениях является сложность контроля многокомпонентного состава газовых примесей и, соответственно, невозможность эффективного управления микроклиматом.

2. Полученные математические модели позволили установить количественную зависимость между молекулярной массой воздушной среды и наличием отдельных ее загрязнителей. Установлена также связь между минимально обнаруживаемой концентрацией любого газа в воздухе и относительной погрешностью измерения скорости ультразвука.

3. На основе предложенной математической модели процесса распространения акустических колебаний в многокомпонентной газовой среде, имитации-

онных моделей пьезопреобразователей и блока ультразвукового контроля обоснованы требования к системе автоматического регулирования концентрации вредных газовых примесей. Разработанное УУЗК позволяет по сравнению с аналогами-газоанализаторами повысить точность и помехозащищенность, надежность, быстродействие, обеспечить расширение диапазона измерений, компенсацию мультипликативных (температурных, влажностных, скоростных, флуктуационных) возмущающих воздействий при контроле концентрации аммиака, углекислого газа и сероводорода в помещениях.

4. Установлены метрологические характеристики индикатора наличия вредных веществ (аммиака, углекислого газа, сероводорода):

- диапазоны измерения значений относительной молекулярной массы воздушной среды составляют: $X_{min}=28,9954$ и $X_{max}=29,2252$;

- погрешность измерения относительной молекулярной массы воздушной среды при доверительной вероятности P , равной 87 %, составила: по аммиаку - $\pm 2,5 \times 10^{-7}$, по углекислому газу - $\pm 1,5 \times 10^{-7}$, по сероводороду - $\pm 1,7 \times 10^{-7}$.

5. Технические характеристики УУЗК позволяют использовать его для индикации наличия вредных веществ, управлять приточно-вытяжной вентиляцией и понизить концентрацию загрязнителей на уровне, не превышающем ПДК рабочей зоны.

6. Годовой экономический эффект от внедрения ультразвукового устройства контроля газового состава в ЗАО «Лебяжье» Егорьевского района Алтайского края на животноводческой ферме крупного рогатого скота на 100 голов составил 72000 рублей.

7. Результаты исследований были использованы при разработке научно-методических и практических рекомендаций «Система ультразвукового контроля газового состава воздушной среды животноводческих помещений», одобренных Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края и принятых для практического использования.

Список основных публикаций по теме диссертационной работы в изданиях по перечню ВАК

1. Недилько И. В. Обоснование требований к ультразвуковому контролю газового состава воздушной среды в животноводческих помещениях / Н. П. Воробьев, И. В. Недилько, О. К. Никольский // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – Красноярск, 2008. – Вып. 3. - С. 220 - 225.

2. Недилько И. В. Автоматизированная система контроля концентрации аммиака в воздухе животноводческих помещений / Н. П. Воробьев, И. В. Недилько // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – 5. – С. 36.

3. Недилько И. В. Ультразвуковой сигнализатор концентрации аммиака в воздухе животноводческих помещений и электронный коммутатор каналов / Н. П. Воробьев, И. В. Недилько // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2009. - № 1-2. – С. 320 - 327.

В других издания

4. Недилько И.В. Ультразвуковой метод контроля вредных веществ в воздухе рабочей зоны предприятий АПК / И.В. Недилько, Н.П. Воробьев // Серия Социальная безопасность населения юга Западной Сибири. Выпуск 12: Материалы V международной научно-практической конференции «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера – приоритетные направления обеспечения социальной безопасности населения юга Западной Сибири. Комплексная безопасность и антитеррористическая защищенность региона на примере Алтайского края» г. Барнаул, 7 декабря 2007 / Под общей редакцией Я.Н. Ишутина, М.Б. Редина. Барнаул: Азбука, 2007. – С. 237-238.

5. Недилько И.В. Проблемы и технические средства обеспечения безопасности при эксплуатации аммиачных холодильных установок / И.В. Недилько, Н.П. Воробьев // Серия Социальная безопасность населения юга Западной Сибири. Выпуск 12: Материалы V международной научно-практической конференции «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера – приоритетные направления обеспечения социальной безопасности населения юга Западной Сибири. Комплексная безопасность и антитеррористическая защищенность региона на примере Алтайского края» г. Барнаул, 7 декабря 2007 / Под общей редакцией Я.Н. Ишутина, М.Б. Редина. Барнаул: Азбука, 2007. – С. 236-237.

6. Недилько И.В. Индикатор наличия вредных веществ в воздухе животноводческих помещений / Н.П. Воробьев, И.В. Недилько // Возобновляемые источники энергии для устойчивого развития Байкальского региона: Материалы III международной научно-практической конференции (25-27 июня 2008 г.). – Улан-Удэ: Изд-во БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2008. - С. 23-28.

7. Недилько И.В. Канал получения информации ультразвукового индикатора наличия вредных веществ в воздухе животноводческих помещений / Н.П. Воробьев, И.В. Недилько, Д.П. Величко // VI международная научно-практическая Интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 01 февраля по 30 апреля 2008 г./ Секция 8. Энерго - и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе. 4 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008]. – Режим доступа: <http://www.ostu.ru/science/confs/2008/ers/papers.html>. - Загл. с экрана.

8. Недилько И.В. Ультразвуковой контроль концентрации аммиака в животноводческих помещениях / О.К. Никольский, Н.П. Воробьев, И.В. Недилько // VI международная научно-практическая интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 01 февраля по 30 апреля 2008 г./ Секция 8. Энерго - и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе. 4 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008]. – Режим доступа: <http://www.ostu.ru/science/confs/2008/ers/papers.html>. - Загл. с экрана.

9. Недилько И.В. Канал получения информации ультразвукового индикатора наличия вредных веществ в воздухе животноводческих помещений / И.В. Не-

Недилько, Н.П. Воробьев // 5-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2008" (НиМ - 2008). Секция «Энергетика». Подсекция «Электрификация и теоретические основы электротехники». – 3 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008] – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/main/review>. - Загл. с экрана.

10. Недилько И.В. Экспериментальные исследования индикатора наличия вредных веществ в воздухе животноводческих помещений / И.В. Недилько, Н.П. Воробьев // 5-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2008" (НиМ - 2008). Секция «Энергетика». Подсекция «Электрификация и теоретические основы электротехники». – 3 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008] – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/main/review>. - Загл. с экрана.

11. Недилько И.В. Индикатор наличия вредных веществ в воздухе животноводческих помещений / И.В. Недилько, Н.П. Воробьев // 5-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2008" (НиМ - 2008). Секция «Энергетика». Подсекция «Электрификация и теоретические основы электротехники». – 3 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008] – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/main/review>. - Загл. с экрана.

12. Недилько И.В. Ультразвуковой контроль концентрации аммиака в животноводческих помещениях / И.В. Недилько, Н.П. Воробьев, О.К. Никольский // 5-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2008" (НиМ - 2008). Секция «Энергетика». Подсекция «Электрификация и теоретические основы электротехники». – 3 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008] – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/main/review>. - Загл. с экрана.

13. Недилько И.В. Автоматизированная система контроля концентрации аммиака в воздухе животноводческих помещений / А.В. Шуклин, И.В. Недилько, Н.П. Воробьев // 5-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2008" (НиМ - 2008). Секция «Энергетика». Подсекция «Электрификация и теоретические основы электротехники». – 3 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2008] – Режим доступа: <http://edu.secna.ru/main/review>. - Загл. с экрана.

14. Недилько И.В. Пути повышения точности измерительных устройств при контроле газового состава воздушной среды в теплицах, животноводческих и птицеводческих помещениях / Н.П. Воробьев, Р.Н. Воробьев, И.В. Недилько // Материалы международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» 26-30 июня 2009 г. – Новосибирск, 2009. – 8 с.

15. Недилько И.В. Оценка метода вспомогательных измерений при контроле газового состава воздушной среды в теплицах, животноводческих и птицеводческих помещениях / Р.Н. Воробьев, И.В. Недилько, Н.П. Воробьев // 6-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Наука и молодежь - 2009" (НиМ - 2009). Секция «Энергетика». Под-

секция «Электрификация и теоретические основы электротехники». – 3 с.
[Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., [2009] – Режим доступа:
<http://edu.secna.ru/main/review>. - Загл. с экрана.

Подписано к печати 12.05.11. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 1,44. Тираж 100 экз. Заказ 11-385. Рег. № 73.

Отпечатано в РИО Рубцовского индустриального института
658207, Рубцовск, ул. Тракторная, 2/6.