

На правах рукописи



Гайда Анна Станиславовна

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО
АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ РАБОЧИХ МЕСТ
ОПЕРАТОРОВ ЗЕРНОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ**

Специальность: 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Зерноград 2020

Работа выполнена в Азово-Черноморском инженерном институте – филиале Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограде.

Научный руководитель: **Липкович Игорь Эдуардович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Устинов Юрий Фёдорович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры строительной техники и инженерной механики имени профессора Н.А. Ульянова;
Кузнецов Алексей Николаевич
кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I», доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Волгоградский ГАУ)

Защита диссертации состоится 03 апреля 2020 г. в 13:30 часов на заседании объединённого диссертационного совета Д 999.021.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» и ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», по адресу: 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Ленина, 21, зал диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Азово-Черноморского инженерного института – филиала ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»: <http://www.dongau.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г. и размещён на официальном сайте ВАК при Министерстве образования и науки России <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет»: <http://www.dongau.ru/>.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Несмиян Андрей
Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности работы комбайнов в существующих экономических условиях может достигаться путем совершенствования и адаптации уже выпускаемой и выпущенной техники к современным требованиям сельскохозяйственного производства, что, с одной стороны, более доступно с точки зрения экономической целесообразности, а с другой стороны должно быть обусловлено охраной труда операторов данных машин. Оптимизация производственных процессов и экономических показателей в данном случае связана с охраной здоровья операторов, что приводит к повышению экономической эффективности работы комбайнов и их рациональной эксплуатации. Чрезвычайно важное значение в этом отношении имеет борьба с шумом на рабочем месте оператора сельскохозяйственных машин и в особенности комбайнов. Таким образом современные тенденции эксплуатации комбайнов в первую очередь направлены на совершенствование технологий, увеличение долговечности и снижение затрат на эксплуатацию машин.

Степень разработанности темы. Вопросам, связанным с решением проблемы шума на рабочем месте операторов сельскохозяйственных машин и в особенности комбайнов в нашей стране посвящен ряд исследований. Наибольший вклад в решение данных вопросов внесли такие учёные как Месхи Б.Ч. (1999), Хидиров Т.Г. (1982), Сулайманов С. (1991), а так же Иванов Н.И. (1990), Устинов Ю.Ф. (1997), Реунов С.В. (2001), Павлов П.И. (2009), Шкрабак Р.В. (2010), Шапров М.Н. (2011), Поливаев О.И. (2014), Кузнецов А.Н. (2015). Однако как показал анализ литературных источников, патентной информации, исследований в выбранном направлении в отношении комбайнов семейства «Енисей» не производилось. Поэтому поиск резервов роста производительности труда операторов комбайнов через повышение комфортности труда и соблюдение операторами соответствующих норм и правил являются важным направлением исследований.

Научная гипотеза. Применение современных информационных и цифровых технологий позволяет улучшить условия труда операторов сельскохозяйственных машин.

Рабочая гипотеза. Улучшение условий труда операторов зерноуборочных комбайнов может осуществляться путём разработки системы оперативного акустического контроля рабочих мест операторов зерноуборочных комбайнов.

Объектом исследования является процесс формирования звукового поля в кабине оператора зерноуборочного комбайна.

Предметом исследований являются разработка системы оперативного акустического контроля рабочего места оператора зерноуборочных комбайнов.

Цель работы – разработка способов снижения шумовой нагрузки на оператора комбайна за счёт внедрения инженерно-технических мероприятий на основе информационных технологий.

Задачи исследования заключается в следующем:

1. Провести анализ состава и структуры информационно-аналитической сети оперативного акустического контроля рабочих мест операторов сельскохозяйственных машин, в частности зерноуборочного комбайна «Енисей КЗС 950».

2. Провести шумовые измерения на рабочих режимах комбайна «Енисей КЗС 950» с целью упрощения процедуры оценки шума на рабочем месте оператора путем выявления наиболее нагруженного акустического режима и оценить их результаты.

3. Составить математическую модель акустического пространства кабины комбайна «Енисей КЗС 950», выбрать и применить программное обеспечение для анализа акустического поля.

4. Разработать селективный алгоритм действий аналитической сети оперативного акустического контроля при получении данных от мобильного пункта контроля.

5. Определить способ и экономическую целесообразность применения шумозащиты оператора комбайна «Енисей КЗС 950».

Научная новизна:

❖ Определены рабочие режимы комбайна «Енисей КЗС 950», с целью рационализации процедуры оценки шума на рабочем месте оператора путем выявления наиболее нагруженного акустического режима.

❖ Составлена математическая модель акустического пространства кабины, выбрано и применено программное обеспечение для анализа акустического поля.

❖ Разработан селективный алгоритм действий аналитической сети оперативного акустического контроля при получении данных от мобильного пункта контроля.

Диссертация выполнена в рамках научно-исследовательской работы энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет».

Теоретическая и практическая значимость работы. Алгоритм расчета «Последовательность действий во время акустической экспертизы рабочего места комбайнера» и математическая модель акустического пространства кабины зерноуборочного комбайна «Енисей КЗС 950» и методика подбора рациональных параметров расширяют знания в области теории зерноуборочных комбайнов и технической акустики.

Практическая ценность. Предложена методика создания инженерно-аналитической информационной сети и инженерного расчета шумовых характеристик в кабинах самоходных зерноуборочных комбайнов типа «Енисей КЗС 950», позволяющая не только выбрать на рабочем месте оператора способы доведения шума до нормативных значений, но и позволить руководителям хозяйства через диспетчерскую службу постоянно следить за шумовым давлением на операторов комбайнов с целью недопущения ими повышения звуковой нагрузки на органы слуха.

Методика и методы исследования. Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования, цифровой обработки сигналов и технической акустики. Лабораторные эксперименты выполнялись по разработанной программе, для их проведения были использованы специально созданная лабораторная установка и соответствующее оборудование. При проведении расчётов и обработке результатов эксперимента использовали современную вычислительную технику с установленным программным обеспечением: так использовалась основное программное обеспечение: Report XL, SMathStudio 0.96, Comsol Multiphysics 4.3, Audacity 2.0.3, Matlab R2012. (редактор Audacity для построения спектра в логарифмической шкале частот; информационное моделирование согласно модели Car Interior; программа COMSOL Multiphysics – COMSOL Acoustics Module

(специализированный пакет); энергетический спектр акустического сигнала по данным звукового файла – программа Audacity 2.0.3).

Положения, выносимые на защиту.

1.Методика создания рациональной структуры и инструментального состава информационно-аналитической сети дистанционного оперативного акустического контроля рабочих мест операторов сельскохозяйственных машин, базирующаяся на технологии мобильного интернета HSDPA и информационных технологиях Wired LAN и Wiress LAN.

2.Способ оценки акустических параметров, предусматривающий точное воспроизведение требований нормативных стандартов и однозначное определение максимально нагруженного акустического режима для конкретной сельскохозяйственной машины - «Енисей КЗС 950».

3.Метод инструментального скоростного контроля шумовых характеристик зерновых комбайнов при широкополосном шуме, и разработанный на его основе алгоритм экспертной оценки шумового воздействия на ОСМ, реализованный в компьютерной программе расчета шумовых характеристик конкретных сельхозмашин («Енисей КЗС 950»).

4.Технология оперативного взаимодействия сельхозпредприятий с учреждениями, занимающимися вопросами охраны труда, предусматривающая простой и недорогой метод стабильной оценки шумовых характеристик рабочих мест ОСМ.

5.Математическая модель, позволившая определить наиболее рациональный способ шумозащиты оператора комбайна, и поскольку основным недостатком на всех режимах работы комбайна является превышение нормативного звукового давления в полосе со среднеквадратичной частотой 500 Гц, поэтому именно акустическое поле этой полосы стало объектом обстоятельного анализа с помощью прикладного программного обеспечения.

Соответствие паспорту специальности 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства. Из формулы специальности: «Значение научно-технических проблем данной специальности для народного хозяйства состоит в ... улучшении условий труда, в обеспечении экологической безопасности»; и области исследований: п. 5 «...создание безопасных и нормальных условий труда, соблюдение требований охраны труда».

Достоверность результатов работы подтверждается: методологической базой исследований, проведением системного анализа решаемых задач и применением современных апробированных теоретических подходов, методов математического анализа, автоматического управления, цифровой обработки сигналов и технической акустики, реализацией математической модели на ЭВМ, сопоставлением результатов теоретических и экспериментальных исследований, результатами внедрения в производство и учебный процесс.

Результаты данной работы докладывались и обсуждались: на ученых советах факультета механизации Луганского национального аграрного университета, г. Луганск, 2010-2016 гг.; на заседаниях кафедры машинопользования в земледелии, ремонта машин и охраны труда Луганского национального аграрного университета, г. Луганск, 2009-2016 гг.; на всеукраинской научно-практической интернет-конференции с международным участием «Новые материалы и перспективные технологии, охрана труда и профессиональное образование», г. Луганск, 2014 год; на научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности и гражданская защита», г. Луганск, 2014 год; на кафедре безопасности жизнедеятельности, охраны труда и гражданской защиты Луганского государственного университета имени Тараса Шевченко, г. Луганск, 2014-2016 гг.; на международной конференции «Актуальные проблемы профессионального образования в республике Беларусь и за рубежом», г. Витебск, Республика Беларусь, 2015 год; на международной конференции по технической акустике, ГНУ «Институт технической акустики НАН Беларуси», г. Витебск, Республика Беларусь, 2016 год; на кафедре техносферной безопасности Луганского национального аграрного университета, г. Луганск, 2017 г.; на международной конференции «Актуальные проблемы профессионального образования в республике Беларусь и за рубежом», г. Витебск, Республика Беларусь, 2017 год; на кафедре «Техносферная безопасность и физика» Азово-Черноморского инженерного института г. Зерноград, 2016-2018 гг.

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии «Агрофирма «Заречное»», город Кременная, Кременской район Луганской области, используются в учебном процессе Азово-Черноморского инженерного института – филиала

ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет» в г. Зернограда, в Луганском национальном университете имени Владимира Даля и в Луганском национальном аграрном университете.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 19 научных работах, в том числе 4 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ; 1 статья в изданиях Scopus. Общий объем публикаций составляет 34,97 печатных листа, из них личный вклад автора 9,64 печатных листа.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, включающих 49 рисунков и 16 таблиц, общих выводов, списка использованных источников, включающего 252 наименований (23 на иностранных языках), 13 приложений. Объем диссертации до списка литературы 134 страницы, общий объем – 174 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы, указана цель работы, вытекающие из нее задачи, и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ состояния вопроса и подходы к решению рационального акустического контроля рабочего места оператора комбайна» проанализировано состояние сельского хозяйства Луганской области и показаны основания выбора для исследований комбайна «Енисей КЗС 950».

Показано, что создание более производительных и мощных самоходных зерноуборочных комбайнов неизбежно сопровождается увеличением уровней шума в их кабинах. Исследования последних лет указывают, что научно-технический прогресс открывает новые возможности в борьбе с шумом, в частности – это информационно-аналитические сети оперативного акустического контроля (ИАС ОАК) рабочих мест операторов сельскохозяйственных машин. Их реализация возможна с помощью мобильного интернета HSDPA в сочетании с информационными технологиями Wired LAN и Wiress LAN. Были проанализированы пути и способы защиты от шума при эксплуатации зерноуборочных комбайнов, а также сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические предпосылки акустической экспертизы рабочего места комбайнера» изложены физические и теоретические основы проведения измерения шума и разработана математическая модель акустического пространства кабины комбайна. Методом конечных элементов в программе COMSOL Multiphysics определены параметры исследуемого акустического поля. Также проведена натурная проверка эффективности МКЭ с помощью специальной камеры Sound Brick, которая приближенно моделирует акустическое пространство кабины.

Общая техническая тенденция обеспечения более точных способов определения параметров акустического поля путем построения адекватных моделей находит свое отражение в государственных стандартах.

Например, для обеспечения соответствия второй степени точности (технический метод, в условиях эксплуатации оборудования), во время измерения для определения уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука в дискретных точках, нужно формировать обводную поверхность.

Одним из вариантов в данном случае является использование параллелепипеда в качестве обводной поверхности для оборудования с последующим определением дискретных точек измерения шума.

Определенным образом это можно рассматривать в качестве грубого варианта разделения обводной поверхности на дискретные предельные элементы.

Поэтому выберем для анализа акустическое пространство кабины в виде параллелепипеда, но с жесткими гранями. Определим предельную верхнюю плоскость (рисунок 1), как Ω_{v1} .

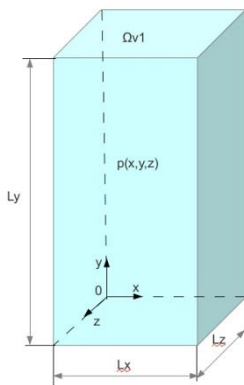


Рисунок 1- Акустическое пространство V (L_x , L_y , L_z)

Декартовое акустическое пространство (рисунок 1) подлежит анализу уравнением Гемгольца для гармонических волн:

$$\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} + k^2 \hat{p} = 0, \quad (1)$$

где $\hat{p}$ – комплексная амплитуда звукового давления, которая зависит от положения точки $k = \omega/c$ – акустическое волновое число (ω – угловая частота колебаний, c – скорость звука).

Для создания модели акустического пространства кабины оператора комбайна воспользуемся известными подходами.

$$\begin{aligned}\frac{\partial \hat{p}}{\partial x} &= 0 \text{ при } x = \begin{cases} 0 \\ l_x \end{cases} \\ \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} &= 0 \text{ при } y = \begin{cases} 0 \\ l_y \end{cases}, \\ \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} &= 0 \text{ при } z = \begin{cases} 0 \\ l_z \end{cases}\end{aligned}\quad (2)$$

Решив уравнение (1), получаем звуковое давление:

$$\begin{aligned}\psi_N(x, y, z) &= \Lambda_N \cdot \cos\left(\frac{n_x \pi x}{l_x}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_y \pi y}{l_y}\right) \cdot \cos\left(\frac{n_z \pi z}{l_z}\right) \\ \Lambda_N &= \sqrt{\varepsilon_{n_x} \cdot \varepsilon_{n_y} \cdot \varepsilon_{n_z}}\end{aligned}\quad (3)$$

где Λ_N – коэффициент, а $\varepsilon_0 = 1$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \dots = 2$; n_x, n_y, n_z – целые числа.

Поскольку акустическое пространство (кабина) имеет металлические (жесткие) стенки, используем для описания модели акустического поля с жесткими стенками функцию Грина:

$$G(r, r_0) = -\frac{1}{V} \sum_m \frac{\psi_m(r) \psi_m(r_0)}{k^2 - k_m^2} \quad (4)$$

То есть мы имеем модель акустического поля в виде суммы мод, причем наибольший вклад в поле каждая мода создает вблизи ее собственной частоты $k = k_m$ (амплитуда имеет выразительный резонансный пик). С помощью метода конечных элементов (МКЭ) оценивается частотный отклик акустического пространства как ограниченного множества модальных векторов.

$$\{p\} = \sum_{i=1}^m a_i [\emptyset] \{a\} = [\emptyset] \{a\} \quad (5)$$

где $\{a\}$ – состоит из модальных коэффициентов m , а матрица $[\emptyset]$ – содержит m модальных векторов.

То есть нужно определять вклад каждой моды из системы $m \times m$ уравнений:

$$([\emptyset]^t [K + i\omega C - \omega^2 M] [\emptyset]) \{a\} = [\emptyset]^t \{F_a\} \quad (6)$$

Системы уравнений достаточно громоздки, поэтому важным является организация преобразований матриц к s-диагональным, хотя в основном матрицы коэффициентов таковыми и являются. Поэтому для элементов модели МКЭ используются полиномы в качестве аппроксимационных функций. Оправданным будет и применение интерполяционного полинома (7):

$$\varphi^e = N \Phi = \left(N_1^{(e)}, N_2^{(e)}, \dots, N_n^{(e)} \right) \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \dots \\ \varphi_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

где n - число элементов, а e - индекс элемента.

Для более точного и корректного разделения пространства на элементы целесообразно использовать геометрию тетраэдров.

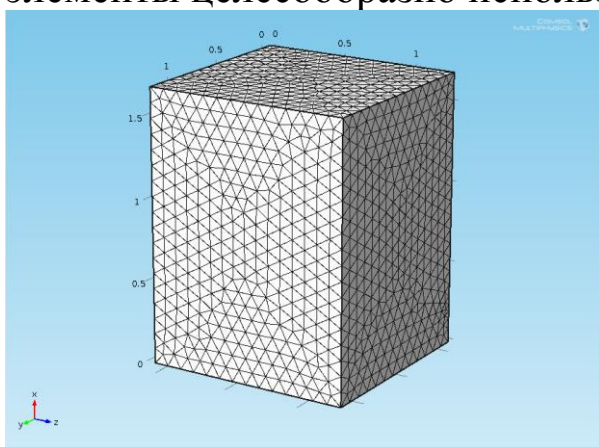


Рисунок 2 - Формирование пространства множеством тетраэдров, в результате получаем акустическое пространство с разделением на конечные тетраэдры

Отметим следующее технологическое обстоятельство: элементы разбиения имеют разные размеры, поскольку необходимо не только точно передавать форму акустического пространства, но и учитывать переменные по условиям задачи параметры.

Для этого регулируют расстояния между граничными узлами с целью дробления элементов.

То есть образуются области, где размеры элементов определены переменными параметрами. Тогда расчеты приобретают большую точность и корректность.

Ориентируясь на рисунок 2, рассмотрим образование поверхностного ансамбля из базовых плоскостей, например, 5 тетраэдров (рисунок 3). Узлы $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ - это степени свободы с известными координатами. После преобразований получим:

$$\begin{aligned} \varphi^{(1)} &= N_2^{(1)} \varphi_2 + N_3^{(1)} \varphi_3 + N_1^{(1)} \varphi_1 \\ \varphi^{(2)} &= N_2^{(2)} \varphi_3 + N_2^{(2)} \varphi_2 + N_4^{(2)} \varphi_4 \\ \varphi^{(3)} &= N_2^{(3)} \varphi_5 + N_3^{(3)} \varphi_3 + N_4^{(3)} \varphi_4 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\varphi^{(4)} = N_2^{(4)} \varphi_6 + N_3^{(4)} \varphi_3 + N_5^{(4)} \varphi_5$$

$$\varphi^{(5)} = N_1^{(5)} \varphi_1 + N_3^{(5)} \varphi_3 + N_6^{(5)} \varphi_6$$

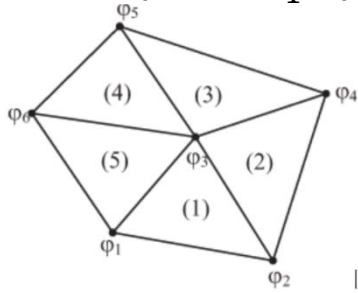


Рисунок 3 - Сегмент, образованный базовыми плоскостями 5 конечных элементов (тетраэдров)

То есть, с помощью (8) формируется сегмент (рисунок 3), а интерполяционные функции получают номера узлов и их координаты. В матричной форме особенности сегмента (рисунок 3) определяются так:

$$\begin{pmatrix} \varphi^{(1)} \\ \varphi^{(2)} \\ \varphi^{(3)} \\ \varphi^{(4)} \\ \varphi^{(5)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_1^{(1)} & N_2^{(1)} & N_3^{(1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_2^{(2)} & N_3^{(2)} & N_4^{(2)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_3^{(3)} & N_4^{(3)} & N_5^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & N_3^{(4)} & 0 & N_5^{(4)} & N_6^{(4)} \\ N_1^{(5)} & 0 & N_3^{(5)} & 0 & 0 & N_6^{(5)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_4 \\ \varphi_5 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Таким образом, вклад каждой моды на основе решения Гемгольца для неоднородного поля и согласно аналитическому решению (4) с использованием (6) может быть определен с помощью МКЭ.

Далее проводилась натурная проверка эффективности МКЭ с помощью специальной камеры.

Для проведения исследований акустического поля по выше предложенному пути решения системы уравнений на базе (1), а также основываясь на (5) и (6) воспользуемся программным обеспечением COMSOL Multiphysics, а именно - COMSOL Acoustics Module. Рассмотрим пространство моделей как приближенное к параллелепипеду (рисунок 1). Отметим: КТИШ – контрольная точка измерения шума, а источник шума находится на плоскости конструкции кабины, что позволяет воспроизводить шумы структурного (через конструкцию) происхождения.

Акустическое пространство Car Interior V (x,y,z) содержит КТИШ с координатами x = 1.34 м, y = 1.22 м, z = 0,8 м и источником звука с координатами x = 0.21 м, y = 0 м, z = 1,28 м.

Натурный эксперимент подтвердил совпадение измеренных (рисунок 4) и расчетных с помощью МКЭ показателей акустического поля в диапазоне 50-250 Гц (рисунок 5), в частотах 250-500 Гц есть разногласия, но пиковые значения легко определяются (рисунок 6). То есть воспроизведение акустического поля моделированием с помощью камеры типа Sound Brick достаточно.

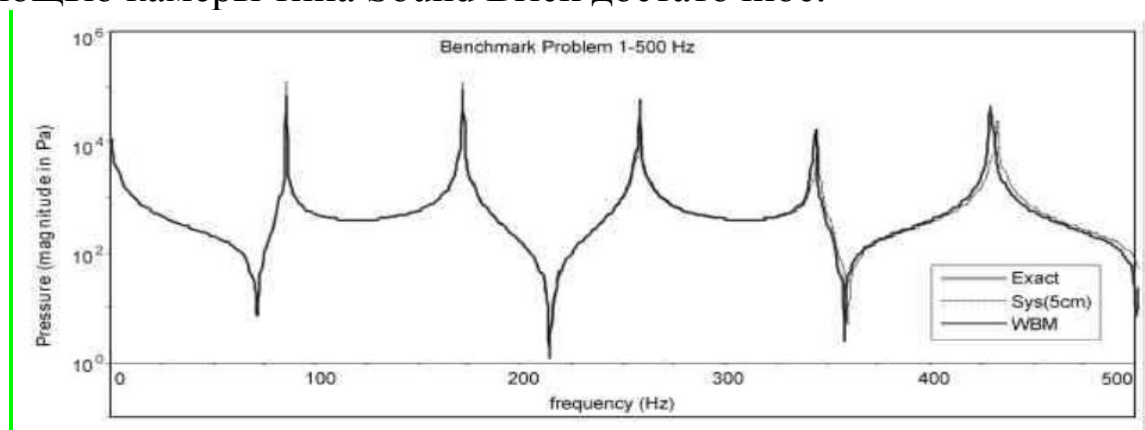


Рисунок 4 - Результаты измерения звукового давления

По оси абсцисс – частота в Гц, по оси ординат – давление в Па

Рассматривая внутреннее пространство кабины комбайна Енисей КЗС 950 как параллелепипед $V = f(x, y, z)$ установим, что источник акустического шума находится в направлении за спиной комбайнера, около нижнего правого трехгранного угла.

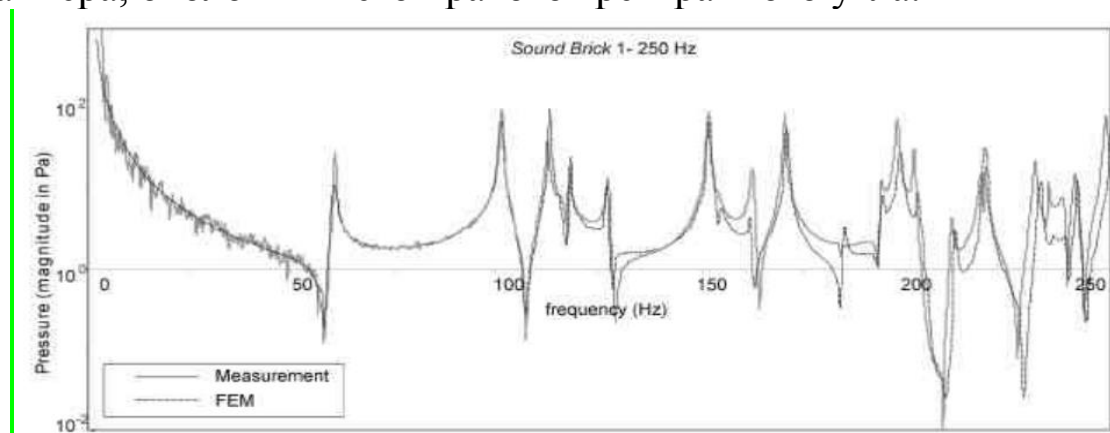


Рисунок 5 - Результаты измерения и расчета звукового давления в диапазоне 0-250 Гц.

По оси абсцисс – частота в Гц, по оси ординат – давление в Па

При этом можно считать источник акустического шума мнимым монополем. Как показали исследования, согласно замерам шумомера, наиболее акустически нагруженной является октавная полоса со среднегеометрической частотой 500 Гц, где во всех измерениях наблюдается превышение допустимого норматива уровня звукового давления.

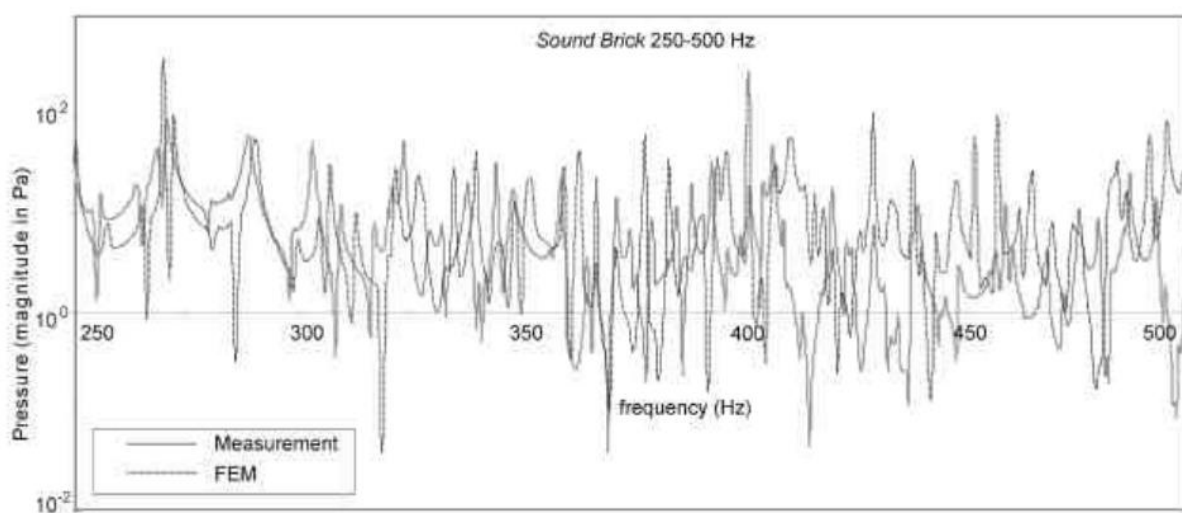


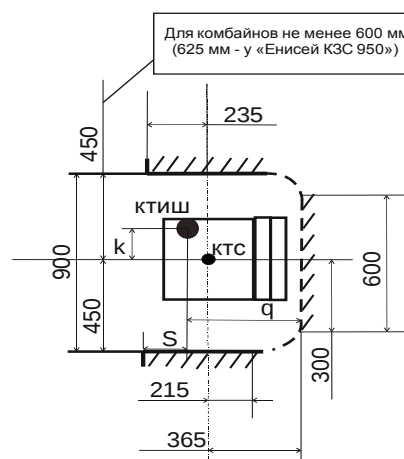
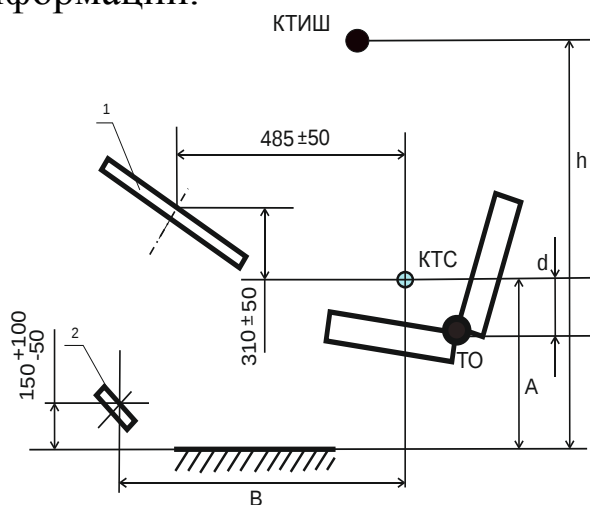
Рисунок 6 - Результаты измерения и расчета звукового давления в диапазоне 250-500 Гц

По оси абсцисс – частота в Гц, по оси ординат – давление в Па

Установим частотный диапазон для расчета (360-710 Гц, что примерно соответствует октавной полосе со среднегеометрической частотой 500 Гц), а также установим шаг расчета = 35 Гц. Далее определим соответствие исследуемой модели по программе COMSOL Multiphysics (модель Car Interior) результатам измерений шумомером в кабине комбайна. Для этого обсчитаем уровень звукового давления в октавной полосе и сравним его с ранее выявленными значениями согласно режимам работы комбайна R1-R6. Октавная полоса со среднегеометрической частотой 500 Гц примерно образована суммой следующих интервалов частот: (360-395) Гц, (395-430) Гц, (430-465) Гц, (465-500) Гц, (500-535) Гц, (535-570) Гц, (570-605) Гц, (605-640) Гц, (640-675) Гц, (675-710) Гц. То есть, рассчитанный согласно модели Car Interior уровень звукового давления для октавной полосы со среднегеометрической частотой 500 Гц (78.53 дБ) практически совпадает с измерением в акустическом режиме R2 (78.42 дБ). Это дает основания для учета пространственного расположения уровней звукового давления.

В третьей главе «Общая программа и методика экспериментального исследования акустического пространства кабины» на основе теоретических предпосылок проведен анализ существующей нормативной базы (применяемых стандартов) в сочетании с анализом математического обеспечения измерительных приборов (шумомеров). Кроме этого предложена последовательность действий (алгоритм) оператора шумомера с применением

адаптированного к условиям эксперимента способа отображения информации.



$d = 97$ мм, h - расстояние от поверхности, регулируемая высота ТОС сиденья;
 B - расстояние от органов управления.

Рисунок 7 - Положение по вертикали контрольной точки для измерения шума (КТИШ)

$d = 97$ мм, h - расстояние от поверхности, регулируемая высота ТОС сиденья;
 $k = 250$ мм, $s = 20$ мм, $q = 430$ мм.

Рисунок 8 - Положение на горизонте контрольной точки для измерения шума (КТИШ)



Рисунок 9 - Комбайн на площадке
для измерений

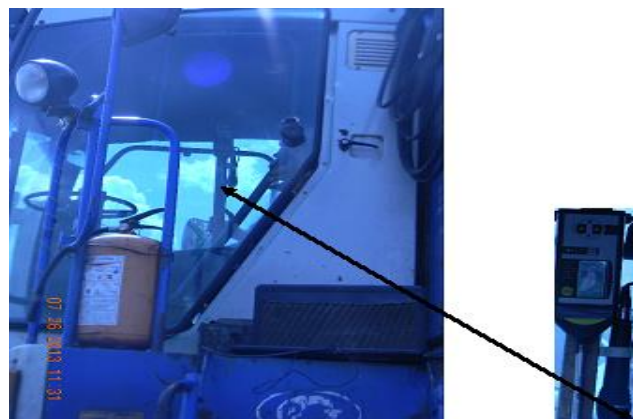


Рисунок 10 - Установка измерительного оборудования и записывающего устройства (с ноутбуком) в контрольной точке измерения шума

Поскольку нашей задачей являлось проведение корректных измерений по соответствующим стандартам, был сделан выбор следующего оборудования требуемой конфигурации. Основное программное обеспечение: Report XL, SMathStudio 0.96, Comsol Multiphysics 4.3, Audacity 2.0.3, Matlab R2012. С целью обеспечения корректности исследований было определено положение контрольной точки измерения шума (КТИШ) в акустическом пространстве кабины

комбайна (рисунки 7 и 8). Для координатного пространства кабины были определены следующие координаты КТИШ $(x_0, y_0, z_0) = (h, d/2-k, bq) = (1140 \text{ мм}, 375 \text{ мм}, 850 \text{ мм})$.

Наиболее нагруженным шумовым режимом работы зерноуборочного комбайна «Енисей КЗС-950» является прямое комбайнирование, когда комбайн одновременно срезает, обмолачивает зерно и собирает солому. Кроме этого дополнительный шум образуется или измельчителем-разбрасывателем соломы, или копнителем, а также системой температурного микроклимата кабины. С целью проведения исследований был составлен алгоритм действий во время акустической экспертизы рабочего места комбайнера. После определения максимально нагруженного шумового режима из вариантов R1-R6 провели измерение R7 на максимально нагруженном акустическом режиме с открытыми дверцами кабины, что позволяет произвести косвенную оценку шумоизоляции кабины комбайна «Енисей КЗС 950». Эксперименты проводились на производственной базе фермерского хозяйства «Агрофирма «Заречное», город Кременная Луганской области на протяжении 2013 года. Комбайн «Енисей КЗС 950» располагался на твердом покрытии (асфальтированная площадка) на расстоянии 37 метров до первых звукоотражающих поверхностей (рисунок 9). Измерения шума по программе для режимов R1-R7 проводились в контрольной точке для измерения шума (КТИШ) путем использования шумомера (рисунок 10). Поскольку основным недостатком на всех режимах работы комбайна является превышение нормативного звукового давления в полосе со среднеквадратичной частотой 500 Гц, акустическое поле именно в этой полосе подлежало обстоятельному анализу с помощью прикладного программного обеспечения.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований и их анализ» изложены результаты эксперимента и их анализ и предложен метод рационального инструментального контроля шумовых характеристик сельскохозяйственных машин при широкополосном шуме.

Применена процедура воспроизведения спектра шума с помощью звукозаписывающего тракта. Для обработки аудиосигналов использовали программу Audacity со шкалой dBFS, причем 0 dBFS соответствует максимальный разряд АЦП, то есть, для звуковой карты разряд равняется 16. Поскольку, для линейного цифрового

кода каждый разряд соответствует 6 дБ, то вся шкала составляет $16 \times 6 = 96$ дБ. Это и есть «0» dBFS. Отметим еще, что наиболее близкой из трех характеристик (Slow - медленно, Fast - быстро, Impulse - импульс) по скорости усреднения к интервалу дискретизации программы Audacity является характеристика Impulse, поскольку время усреднения согласно руководства «Прецизионный шумомер Октава 110А. – Руководство по эксплуатации, РЭ 4381-003-76596538-06» составляет 35 м/с против 125 мс (Fast) и 1 с (Slow). То есть, в отличие от стандартного использования режима «медленно» согласно «ГОСТ 12.4.095-80 Машины сельскохозяйственные самоходные. Методы определения вибрационных и шумовых характеристик» более целесообразно использовать записанные значения на характеристике «импульс», учитывая к тому же их несколько больший уровень.

Оценка влияния прироста энергии приведена в таблице 1 на соответствующих режимах работы комбайна R (R4 – максимально акустически нагруженный режим, R7 – экспериментальный режим на базе режима R4).

Таблица 1 - Значения усредненных уровней звукового давления по измерениям шумомера в октавных полосах на временной характеристике “медленно” на соответствующих акустических режимах (R) работы комбайна

R	Уровни звукового давления в октавных полосах с соответствующими средне-геометрическими частотами, дБ								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
R4	100.33	88.79	86.60	78.70	81.56	70.90	68.87	65.33	56.60
R7	97.29	89.35	92.06	86.98	85.67	79.77	76.75	74.16	70.86

То есть, согласно точности воспроизведения изменений звукового давления на характеристике Impulse, наиболее информативными параметрами спектра звукового сигнала аудиотракта являются уровни в сетке dBFS в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 Гц и 1000 Гц. Наибольший прирост энергии акустического шума в экспериментальном режиме R7 наблюдается в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 Гц, 125 Гц, 250 Гц.

Таким образом, факт увеличения шумовой нагрузки на комбайнера можно обнаружить по параметрам аудиосигнала, записанного в кабине. При этом для сравнений используются данные

согласно предыдущему измерению на базе нормативной методики с использованием записи измерений по временной характеристике «IMPULSE». В качестве информативных параметров для анализа изменений уровней сигнала аудиотракта предлагаются следующие: 1) оценка динамики уровней в сетке dBFS в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 Гц и 1000 Гц; 2) оценка перемещения максимума уровней аудиосигнала в сетке dBFS с определением прироста уровней в аудиотракте (θ LP5) в группе октавных полос

Согласно заранее определенной регулярности в кабине комбайна, расположенного на стояночной площадке, проводилась аудиозапись на режиме, подобном режиму R4. При этом устанавливается наиболее акустически нагруженный режим с параметрами: обороты коленчатого вала двигателя составляют 2000 об./мин., (скорость оценивается с помощью стационарного тахометра); частота вращения барабана обмолота 1240 об./мин., частота вращения мотовила 18 об./мин. Аудиозапись проводится не менее 1 минуты. (То есть, на этом этапе выполняет свои задачи мобильный пункт контроля). После этого записанный аудиофайл передается с помощью модема в центральный пункт информационно-аналитической сети, где проводится обработка файла аудиозаписи с целью оценки динамики уровней в сетке dBFS в октавных полосах со среднегеометрическими частотами 63 Гц и 1000 Гц и перемещение максимума уровней аудиосигнала в сетке dBFS с определением прироста уровней в аудиотракте (θ LP5) в группе октавных полос. На основе этого анализа делается вывод об изменении состояния шумовой нагрузки на комбайнера относительно предыдущего измерения по нормативной методике.

Алгоритм работы схемы активного гашения шума заключается в том, чтобы принять сигнал действительного шума, усилить его, развернуть фазу на 180 градусов, учесть задержку сигнала и излучить антишумовой звук. По нашим подсчетам, это под силу устройству, оборудованному 200 МГц специализированным процессором. Позитивным является еще и то, что по результатам исследования установлена наиболее акустически нагруженная во всех режимах октавная полоса (среднегеометрической частота 500 Гц), которая влияет на общее превышение уровня звука. То есть алгоритмы оценки спектра входного шумового сигнала могут быть упрощены.

В пятой главе «Экономическая эффективность применения системы акустического контроля рабочего места оператора зерноуборочного комбайна» установлено, что снижение звуковой нагрузки в пределах 7дБА увеличивает производительность комбайна за сутки на 7,3%, что соответствует в натуральном выражении 22,4 т за трёхсменную работу в течение 10 дней. При производительности 9,9 т/час падение производительности комбайна, связанное с оператором, на 10% приведет к снижению выработки в час на 0,9 т. А за 8-часовую смену потери составят 7,2 т. За 10 дней это составит 72 т зерна. Что в стоимостном выражении в ценах 2016 года 11000 руб./т (3-й класс зерно озимой пшеницы) без НДС составит соответственно 792000 руб. Таким образом, только за 10 дней работы одного комбайна может экономиться до миллиона рублей. Направление работы и предложенный подход соответствует концепции глобального управления качеством - TQM, Total Quality Management, т.е. стандартам качества ISO.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Задача исследования достигнута путем адекватного программного воспроизведения проведенных акустических измерений, что позволило снизить шумовую нагрузку на оператора комбайна «Енисей КЗС 950» путём внедрения рациональных инженерно-технических мероприятий осуществленных на основе современных информационных технологий, что позволило максимально снизить звуковое давление на органы слуха и организм комбайнера и достичь показателей расчётной модели, рассчитанный согласно модели Car Interior уровень звукового давления для октавной полосы со среднегеометрической частотой 500 Гц (78.53 дБ), и что практически совпадает с измерением в акустическом режиме R2 (78.42 дБ).

2. Приведены рациональная структура и инструментальный состав информационно-аналитической сети дистанционного оперативного акустического контроля (ИАС ОАК) рабочих мест операторов сельскохозяйственных машин (ОСМ), базирующаяся на технологии мобильного интернета HSDPA и информационных технологиях Wired LAN и Wiress LAN, позволяющие проводить диспетчеризацию текущих производственных процессов практически

в каждом хозяйстве и производить регулирование процессов охраны труда операторов комбайнов в полевых условиях. Разработана и апробирована в реальных условиях технология оперативного взаимодействия сельхозпредприятий с учреждениями, занимающимися вопросами охраны труда, предусматривающая простой и недорогой метод стабильной оценки шумовых характеристик рабочих мест ОСМ.

3. Разработана математическая модель акустического пространства кабины комбайна, решение которой позволяет находить способы для пространственного размещения изоповерхностей во всем исследуемом акустическом пространстве, а не только в выбранной согласно стандарту контрольной точке, и позволившей определить наиболее рациональный способ шумовой защиты оператора комбайна.

4. Разработан селективный алгоритм действий аналитической сети оперативного акустического контроля при получении данных от мобильного пункта контроля. В рамках ИАС ОАК разработана методика оценки акустических параметров, предусматривающая точное воспроизведение требований нормативных стандартов и однозначное определение максимально нагруженного акустического режима для конкретной сельскохозяйственной машины.

5. На основании проведенных исследований установлено, что максимально нагруженным акустическим режимом по уровню звука является режим R4 (скорость барабана обмолота – 1240 об./мин., скорость мотвила – 18 об./мин.), то есть максимальная скорость барабана обмолота при минимальной скорости мотвила, что соответствует режиму уборки влажной пшеницы при условиях минимальных потерь зерна от выбивания. На базе режима R4 создан режим R7 (скорость барабана обмолота – 1240 об./мин., скорость мотвила – 18 об./мин., двери кабины открыты). Результаты измерений по режиму R7 (скорость барабана 1240 об./мин., скорость мотвила 18 об./мин., двери кабины открыты) занесены в приложение К; значение шумовых характеристик, полученных на режиме R7 могут быть использованы для оценки шумоизоляционных свойств кабины.

6. Рассчитанная экономическая эффективность метода показала, что при работе двух аналогичных комбайнов при трехсменной работе потери зерна пшеницы составили при отсутствии шумозащиты 21,5 т

в 2016 году. В то же время расчёты показали, что при односменной работе предотвращение потерь в ценах 2016 года составило – 11000 руб./т (3-й класс зерно озимой пшеницы) без НДС составила 792000 руб. Так же выполненная по шумозащите оператора комбайна работа соответствует концепции глобального управления качеством – TQM, Total Quality Management, т.е. стандартам качества ISO.

Рекомендации производству

1. С целью предотвращения снижения производительности труда операторов комбайнов и потерь во время уборки, что связано с повышением утомляемости и в различной степени потери трудоспособности, применять, как бюджетный вариант, для защиты органов слуха комбайнёров специальных противошумных наушников.

2. Для управления шумом на производстве создавать малобюджетные системы взаимодействия небольших хозяйств с заинтересованными организациями в сфере охраны труда операторов комбайнов. Оперативное взаимодействие осуществлять путем использования технологий мобильного интернет доступа, особенности которого достаточно легко рассчитываются под выбранную территорию.

3. Использовать созданный в диссертационном исследовании алгоритм для создания и использования упрощенных методик оценки шумовой нагрузки на любые транспортные средства, оборудованные кабинами.

4. Расширить, благодаря особенностям выстраивания ИАС ОАК, предложенным в диссертации, спектр организаций, которые могут содержать центральные пункты диспетчеризации и акустические лаборатории на хозрасчетных началах.

Перспективы дальнейшей разработки темы

1. Поскольку вопрос выбора схемы шумозащиты – это вопрос оптимизации, необходимо более глубоко исследовать схемы активного гашения шума с адаптивными алгоритмами и применением микроэлектроники, в частности – специализированных процессоров.

2. Оценить шумозащитные и эксплуатационные возможности глушителей интерференционного типа.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Гайда, А.С.** Воздействие шума на организм оператора в производственных условиях / А.С. Гайда // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №06(120). – IDA [article ID]: 1201606072. -Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/72.pdf> (0,59 п.л./ 0,59 п.л.).

2. **Гайда, А.С.** Методика измерений акустической безопасности в кабинах операторов сельскохозяйственных машин / А.С. Гайда // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №06(120). – IDA [article ID]: 1201606073. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/73.pdf> (0,64 п.л./0,64 п.л.).

3. **Гайда, А.С.** Шум в сельском хозяйстве и подходы к вопросу борьбы с ним при эксплуатации оборудования и машин на основе новейших технологий / Гайда А.С. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №07(121). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/77.pdf>, 2,125 у.п.л. – IDA [article ID]: 1211607077. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-121-077> (1,50 п.л./ 1,50 п.л.).

4. **Гайда, А.С.** Сравнение спектрограмм наиболее акустически нагруженных режимов работы комбайнов / Гайда А.С. // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №07(121). – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/07/pdf/78.pdf>, 2,250 у.п.л. – IDA [article ID]: 1211607078. <http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-121-078> (1,59 п.л./1,59 п.л.).

Публикации в изданиях Scopus:

5. Lipkovich I. E. Influence of the human-machine systems (HMS) operation mode on the increase of grain-harvesting aggregates productivity / Igor E. Lipkovich, Irina V. Egorova, Nadezhda V. Petrenko, **Anna S. Gayda** // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments (JMERE) 42(3) (2019) 10-14; DOI : <http://doi.org/10.26480/jmerd.03.2019.10.14> (0,9 п.л./0,2 п.л.).

Монография:

6. Шабанов, Н.И. Эргономика и психофизиологические основы безопасности труда в агроинженерной сфере: монография [Текст] / Н.И.Шабанов, И.Э. Липкович, Н.В. Петренко, С.М. Пятикопов, А.В. Пикалов, И.В. Егорова, **А.С. Гайда**. – Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО Донской ГАУ в г. Зернограде, 2018. – 266 с. – С. 243-261. (30,92 п.л./ 1,60 п.л. автора).

Публикации в сборниках научных трудов:

7. Кириченко, В.Е. Методологические основы синтеза схем технических систем [Текст] / В.Е. Кириченко, М.В. Орешкин, А.С. **Гайда**. – Сборник научных трудов Луганского национального аграрного университета.- Серия: технические науки.- №65/88.- Луганск: ЛНАУ, 2006.- С.153-163 (0,93 п.л./0,3 п.л.).

8. **Гайда, А.С.** Методические основы исследования шума [Текст] / А.С. Гайда. – Научный вестник Луганского национального аграрного университета. – Серия: Техническое науки. - Луганск: Изд-во ЛНАУ, 2013. - №51. – 311. С. – С.121-126. (0,35 п.л./0,35 п.л.).

9. **Гайда, А.С.** Основы исследования вибрации [Текст] / А.С. Гайда – Научный вестник Луганского национального аграрного университета. – Серия: Техническое науки.- Луганск: Изд-во ЛНАУ, 2013. - №51. – 311. С. – С.127-134. (0,47 п.л./ 0,47 п.л.).

10. Кириченко, В.Е. Методы борьбы с шумом и вибрацией при эксплуатации зерноуборочных комбайнов [Текст] / В.Е. Кириченко, З.У. Болоташвили, А.С. **Гайда**. – технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенка. Выпуск 145. «Технический сервис машин для растениеводства». – Харьков: Изд-во А.П. «Апостроф», 2014.- 224с. – С.193-197 (0,23 п.л./ 0,08 п.л.).

Материалы конференций

11.**Гайда, А.С.** Возможности снижения шума при работе комбайнов [Текст] / А.С. Гайда / Сборник тезисов докладов научно-практической конференции Луганского национального аграрного университета. 14-23 января 2013 г. – Луганск: Изд-во ЛНАУ, 2013. – 42. С. – С.27-28 (0,31 п.л./0,31 п.л.).

12. Орешкин, М.В. Воздействие шума на организм [Текст] / М.В. Орешкин, А.С. **Гайда** / Нові матеріали і перспективні технології, охорона праці і професійна освіта: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. з міжнар. участю (м. Луганськ, 4 квіт. 2014 р.). – [Статья]. – Луганськ: Вид-во ДЗ «ЛНУ імені Тараса Шевченка», 2014. – 196 с. – С.168-170 (0,35 п.л./ 0,15 п.л.).

13. Орешкин, М.В. Воздействие шума на организм [Текст] / М.В. Орешкин, А.С. **Гайда** / Науково-практична конференція «Безпека життєдіяльності та цивільний захист: шляхи вдосконалення викладання». – Матеріали конференції. – 15 квітня 2014 року. – [Тезисы]. – Луганськ: Навчально-методичний центр цивільного захисту та безпеки життєдіяльності Луганської області. – 2014. – С.122-123 (0,23 п.л./ 0,1 п.л.).

14. **Гайда, А.С.** Снижение шумовой нагрузки как важный социальный фактор [Текст] / А.С. Гайда / Актуальные проблемы профессионального образования в Республике Беларусь и за рубежом: материалы III Международной научно-практической конференции, Витебск: В 3-х т. / Витебский филиал Международного университета «МИТСО»; редкол.: А.Л. Дединкин (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2016. – Т.3. – 329 с. – С. 299-302. (0,24 п.л./0,24 п.л.).

15. **Гайда, А.С.** Система автоматизированного мониторинга шума [Текст] / А.С. Гайда. - Международная научная конференция «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы». 26 – 29 сентября 2016 года. Витебск, Беларусь: материалы конференции/ УО «ВГТУ» – Витебск, 2016 – 257 с. (0,23 п.л./0,23 п.л.).

16. **Гайда, А.С.** Информационное воздействие шума на организм [Текст] / А.С. Гайда. Актуальные проблемы профессионального образования в Республике Беларусь и за рубежом: материалы IV Международной научно-практической конференции, Витебск: В 2-х ч. / Витебский филиал Международного университета «МИТСО»; редкол.: А.Л. Дединкин (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2017. – Ч.2. – 409 с. – С. 335-337 (0,35 п.л./0,35 п.л.).

17. Липкович, И.Э. Оценка шумовой нагрузки, как способ охраны здоровья человека [Текст] / И.Э. Липкович, **А.С.Гайда.** - Актуальные проблемы профессионального образования в Республике Беларусь и за рубежом: материалы V Международной научно-практической конференции, Витебск, 15 декабря 2017 г.: в 2-х ч. / Витебский филиал Международного университета «МИТСО»; редкол.: А.Л. Дединкин (гл. ред.) [и др.]. – Витебск, 2017. – Ч.1 – 536 с. – С. 252-254. – (0,34 п.л./0,17 п.л.).

19. Липкович И.Э. Математическая модель акустического пространства кабины оператора сельскохозяйственных машин [Текст] / И.Э. Липкович, **А.С. Гайда** / Проблемы развития научной конкуренции в области высоких технологий: сборник статей Международной научно-практической конференции (1 апреля 2019 г, г. Уфа). - Уфа: Аэтерна, 2019. – 37 с. – С.9-16 – (1,0 п.л./0,5 п.л.).

Подписано в печать 28.01.2020 г.

Формат 60×84/16. Усл. п. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 38.

Отдел информационных технологий и издательской деятельности

Азово-Черноморского инженерного института –

филиала ФГБОУ ВО Донской ГАУ

347740, г. Зерноград Ростовской области, ул. Советская, 15