

УДК: 614.872.4

OECD: 1.03

Изучение акустических характеристик на площадке выхода комбайна

Крутова В.А.¹, Завьялов Д.С.²¹Д.т.н., доцент, и.о. зав. кафедрой «Механика деформируемого твердого тела»²Ассистент кафедры «Механика деформируемого твердого тела»^{1,2}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Целью данной работы является экспериментальное исследование акустических характеристик (уровней шума) на площадке выхода кормоуборочного комбайна при различных режимах его работы. Методы исследования включали натурные измерения уровней звукового давления и эквивалентных уровней звука в полевых условиях с использованием сертифицированных шумомеров-анализаторов спектра. Измерения проводились для различных конфигураций работающего оборудования: только двигатель, двигатель с отдельными агрегатами (молотильный барабан, вентилятор, роторы) и при работе всех технологических агрегатов одновременно. Полученные данные сравнивались с требованиями санитарных норм (ГОСТ, СанПиН). Основные результаты показали, что при работе только двигателя эквивалентный уровень шума превышает норму (80 дБА) на 5,9 дБА, достигая 85,9 дБА. При включении всех рабочих органов зафиксировано максимальное превышение на 15,4 дБА (уровень шума составил 95,4 дБА). Наиболее значительные превышения наблюдаются в средне- и высокочастотном диапазонах (125–8000 Гц). Кормоуборочный комбайн является интенсивным источником шума, создающим существенное превышение допустимых уровней на площадке выхода, что подтверждает необходимость совершенствования конструкций машин и применения дополнительных средств шумозащиты для обеспечения безопасности операторов и персонала.

Ключевые слова: уровни шума, комбайн, акустические характеристики, сельское хозяйство, уровень звукового давления

Studying the Acoustic Characteristics at the Combine Harvester's Discharge Area

*Krutova V.A.¹, Zavyalov D.S.²*¹*D.Sc., Associate Professor, Acting Head of the Department of Mechanics of Deformable Solids*²*Assistant of the Department of Mechanical of Deformable Solids*^{1,2}*Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia*

Abstract

The aim of this work is an experimental study of the acoustic characteristics (noise levels) at the exit area of a forage harvester under various operating modes. The research methods included field measurements of sound pressure levels and equivalent sound levels using certified sound level meters and spectrum analyzers.

Measurements were carried out for different configurations of the operating equipment: engine only, engine with individual units (threshing drum, fan, rotors), and with all technological units operating simultaneously. The obtained data were compared with the requirements of sanitary standards (GOST, SanPiN). The main results showed that with only the engine running, the equivalent noise level exceeds the standard (80 dBA) by 5.9 dBA, reaching 85.9 dBA. When all working parts were engaged, a maximum exceedance of 15.4 dBA was recorded (the noise level was 95.4 dBA). The most significant exceedances are observed in the mid- and high-frequency ranges (125–8000 Hz). The forage harvester is an intensive source of noise, creating a significant exceedance of permissible levels at the exit area, which confirms the need to improve machine designs and apply additional noise protection measures to ensure the safety of operators and personnel.

Keywords: noise levels, combine harvester, acoustic characteristics, agriculture, sound pressure level

Введение

Сельское хозяйство представляет собой одну из ключевых отраслей экономики, обеспечивающую продовольственную безопасность государства. Особую значимость в цикле сельскохозяйственных работ имеет уборочная кампания, эффективность которой во многом определяется трудом комбайнёров.

Работа оператора комбайна сопряжена с серьёзными профессиональными вызовами: ему необходимо одновременно управлять сложной техникой и визуально контролировать качество собираемого урожая. Это требует непрерывной концентрации внимания, а также периодического покидания кабины – для осмотра площадки выхода комбайна.

Существенным негативным фактором, влияющим на здоровье и производительность комбайнёров, выступают шум и вибрация. Они не только провоцируют развитие профессиональных заболеваний (вибрационной болезни, неврита слуховых нервов), но и приводят к снижению эффективности труда на 10–15 %. Поскольку деятельность комбайнёров имеет принципиальное значение для аграрного сектора, минимизация воздействия этих вредных факторов становится обязательной задачей.

Обзор литературы показывает, что существующие методики, алгоритмы, а также практические рекомендации по снижению виброакустических характеристик в основном касаются внутреннего шума, возникающего внутри кабин сельскохозяйственных машин [1-9]. Тогда как санитарные нормы, принятые для данного вида техники, регламентируют нормы шума на площадках выхода и на расстоянии 7,5 м от комбайна [10].

В настоящей работе впервые проведено детальное исследование внешнего шума кормоуборочного комбайна именно на площадке выхода – зоне периодического пребывания оператора. Новизна подхода заключается в отдельной оценке вклада каждого технологического агрегата (двигателя, молотильного барабана, вентилятора, роторов, наклонной камеры и жатки) в общий акустический фон.

1 Техническое описание кормоуборочного комбайна и требования к его акустическим характеристикам

Кормоуборочный комбайн представляет собой многофункциональную сельскохозяйственную машину, предназначенную для полной механизации процесса сбора и подготовки кормов. Он осуществляет скашивание, измельчение и погрузку в транспортное средство сеяных или естественных трав, а также подбор и измельчение

массы из валков. В отличие от зерноуборочного комбайна, основным продуктом является не зерно, а измельчённая зелёная масса (силос, сенаж), что определяет специфику его рабочих органов. На рисунке 1 приведена технологическая схема комбайна.

Универсальность такого вида комбайнов достигается за счет использования сменных рабочих органов – кроме жатки и подборщика, могут устанавливаться специальные головки для уборки кукурузы, подсолнечника и других культур с особыми агротехническими требованиями. Это превращает комбайн в ключевой элемент системы точного земледелия, способный адаптироваться к различным условиям уборки.

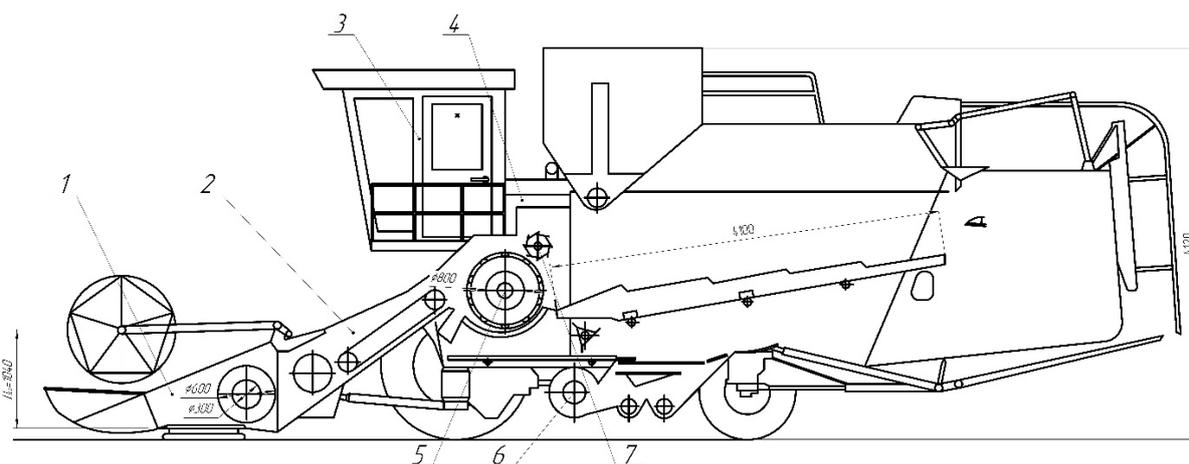


Рисунок 1 – Технологическая схема комбайна: 1 – жатка; 2 – наклонная камера; 3 – кабина; 4 – двигатель; 5 – измельчающий барабан; 6 – вентилятор; 7 – роторы

С точки зрения акустики, интерес представляют узлы, являющиеся основными источниками шума:

- Двигатель внутреннего сгорания (4) – высокооборотный дизель с турбонаддувом, создающий широкополосный шум и шум выхлопа.

- Измельчающий барабан (5) и роторы (7) – генерируют высокочастотный шум при резании и ударах.

- Вентилятор (6) – источник аэродинамического шума, обеспечивающий пневмотранспортировку измельченной массы по силосопроводу.

- Жатка (1) и наклонная камера (2) – создают шум при работе режущего аппарата и транспортировке стеблей.

Кабина оператора (3) выполняет функцию звукоизоляции, однако оператор периодически покидает её для осмотра технологических узлов, подвергаясь воздействию внешнего шума.

Таким образом, кормоуборочный комбайн представляет собой сложный сельскохозяйственный агрегат, сочетающий в себе несколько технологических операций, от скашивания до погрузки измельчённой массы. Высокая интенсивность работы и наличие множества механических узлов, таких как двигатель, молотильный барабан, вентилятор и роторы, неизбежно сопровождаются значительным уровнем шума. Учёт акустических характеристик в процессе проектирования и эксплуатации комбайнов является важным аспектом для создания безопасных условий труда операторов.

Современные стандарты и требования к комбайнам уделяют значительное внимание именно защите оператора от шума. Кабина является основным шумозащитным сооружением, и ее конструкция должна обеспечивать не только механическую безопасность, но и эффективную защиту от шума. Это достигается за счет применения

многослойного остекления, уплотнителей, виброизолирующего крепления кабины к раме, а также специальных звукопоглощающих материалов в отделке внутренних панелей.

Важным аспектом является также оценка внешнего шума, который воздействует на оператора, при его нахождении на открытом участке рабочей площадки, окружающую среду и персонал, работающий вблизи комбайна.

Требования к акустическим характеристикам на рабочих местах комбайнов установлены стандартами по шуму СанПиН 1.2.3685-21 [10], ГОСТ 12.1.003-2014 [11], ГОСТ 12.2.019-15 [12] (таблица 1).

Таблица 1 – Допустимые уровни шума на рабочих местах и на расстоянии 7,5 м от оси движения комбайна

Средние геометрические частоты октавных полос, Гц	Уровни звукового давления, дБ
31,5	107
63	95
125	87
250	82
500	78
1000	75
2000	73
4000	71
8000	69

Эквивалентный уровень звука на рабочих местах и на расстоянии 7,5 м от оси движения комбайна не должен превышать 80 дБА

Превышение данных нормативов требует разработки мер по снижению шума, что подтверждает актуальность данного исследования.

2 Методика измерения шума кормоуборочного комбайна

Целью экспериментальных исследований являлось определение уровней звука и звукового давления на площадке выхода кормоуборочного комбайна, при различных режимах работы технологических агрегатов.

Измерения акустических характеристик проводились в полевых условиях эксплуатации комбайнов на экспериментальной ферме в Ленинградской области. Испытания выполнялись последовательно в двух конфигурациях: при работе комбайна только с включенным двигателем, а также с поэтапным подключением технологических агрегатов для оценки их вклада в общий акустический профиль. Контроль рабочих параметров, включая частоту оборотов двигателя и кинематику рабочих органов комбайна, производился на основе показаний штатной системы мониторинга, данные с которой считывались на информационной панели, расположенной в кабине оператора.

Измерения проводились в нормируемом диапазоне частот 31,5–8000 Гц. Для каждого режима работы комбайна выполнялось не менее пяти измерений, длительность каждого составляла не менее 5 минут. При проведении испытаний были сведены к минимуму внешние источники шума. Измерения проводились на площадке выхода из кабины комбайна, причем микрофон шумомера, при проведении измерений, располагался на уровне органа слуха оператора.

Результаты данных измерений в зависимости от разброса полученных значений усреднялись следующим образом:

– если разность полученных значений меньше 7 дБА, то среднее значение определяется по формуле:

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i, \quad (1)$$

где L_i – измеренный уровень звука, дБА;

n – число измерений.

– если разность выше 7 дБА, то среднее значение определяется по формуле:

$$\bar{L} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} - 10 \lg n. \quad (2)$$

Для измерений использовались следующие разновидности шумомеров: с микрофонами и вибропреобразователи (рисунок 2), характеристики которых приведены в таблице 2. Для проверки работоспособности приборов используется калибратор шума и вибрации - акустический «ЗАЩИТА-К».



Рисунок 2 – Шумомеры, используемые в ходе эксперимента

Таблица 2 – Перечень средств измерения

№ п/п	Наименование	Зав. №	Микрофон	Предусилитель
1	2	3	4	5
1	Шумомер – анализатор спектра	110096	ВМК-205 зав. № 6918	P200 зав. № 112671
2	Шумомер – анализатор спектра «Октава-110А»	120118	ВК 4133 зав. № 32365	P200 зав. № 154329
3	Шумомер-вибромметр, анализатор спектра «Экофизика-110А»	БА170428	ВМК-205 зав. № 5538	P200 зав. № 175187
4	Шумомер-вибромметр, анализатор спектра «Экофизика-110А»	БА170427	ВМК-205 зав. № 5942	P200 зав. № 175191

3 Результаты и обсуждения

Спектр шума на площадке выхода комбайна с выключенными технологическими агрегатами, то есть только с включенным двигателем представлен на рисунке 3, показывают отсутствие превышения уровня звукового давления на всех октавах для всех рассмотренных измерений.

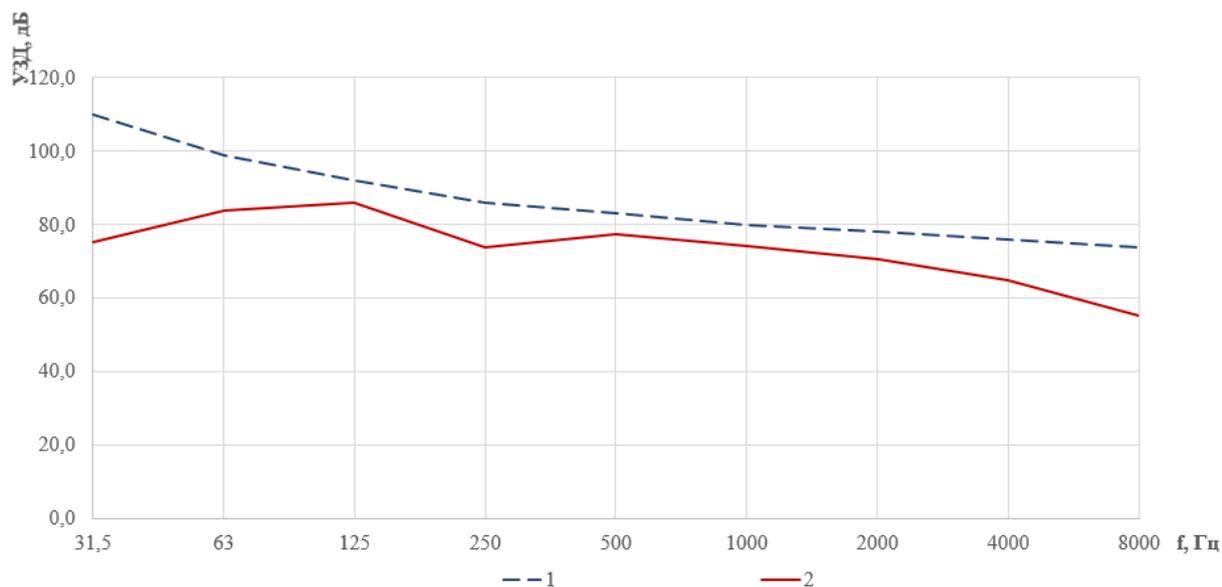


Рисунок 3 – Спектры шума на площадке выхода комбайна: 1 – санитарная норма; 2 – с включенным двигателем

Спектры шума на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами, представленные на рисунке 4, показывают отсутствие в первых октавах превышения уровня звукового давления (УЗД) для всех рассмотренных измерений. Далее отмечаются превышения для всех испытаний в которых были включены молотильный барабан, вентилятор и роторы: на частоте равной 125 Гц, наибольшая (с включёнными двигателем, молотильным барабаном, вентилятором, роторами, наклонной камерой и жаткой) разница между санитарной нормой и полученным уровнем звукового давления составляет 9 дБ, на частоте 250 Гц, наибольшая разница между санитарной нормой и полученным уровнем звукового давления составляет 11 дБ. В интервале 500...8000 Гц величина превышения достигает своего максимального значения, равного 10 дБ (на частоте 500 Гц достигает 14 дБ, 1000 Гц – 11 дБ, 2000 Гц – 8 дБ, 4000 Гц – 6 дБ, на частоте 8000 Гц превышение составляет 5 дБ).

На рисунке 5 приведена сравнительная гистограмма значений эквивалентного уровня звука (дБА) на площадке выхода комбайна относительно установленных санитарных норм.

Измерения показали, что в случае с работающим двигателем значение эквивалентного уровня звука превышает санитарную норму. Значение эквивалентного уровня звука при рабочем двигателе равно 85,9 дБА, что превышает значение санитарной нормы на 5,9 дБА.

На рисунке 6 приведена сравнительная гистограмма значений эквивалентного уровня звука (дБА) на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами относительно установленных санитарных норм.

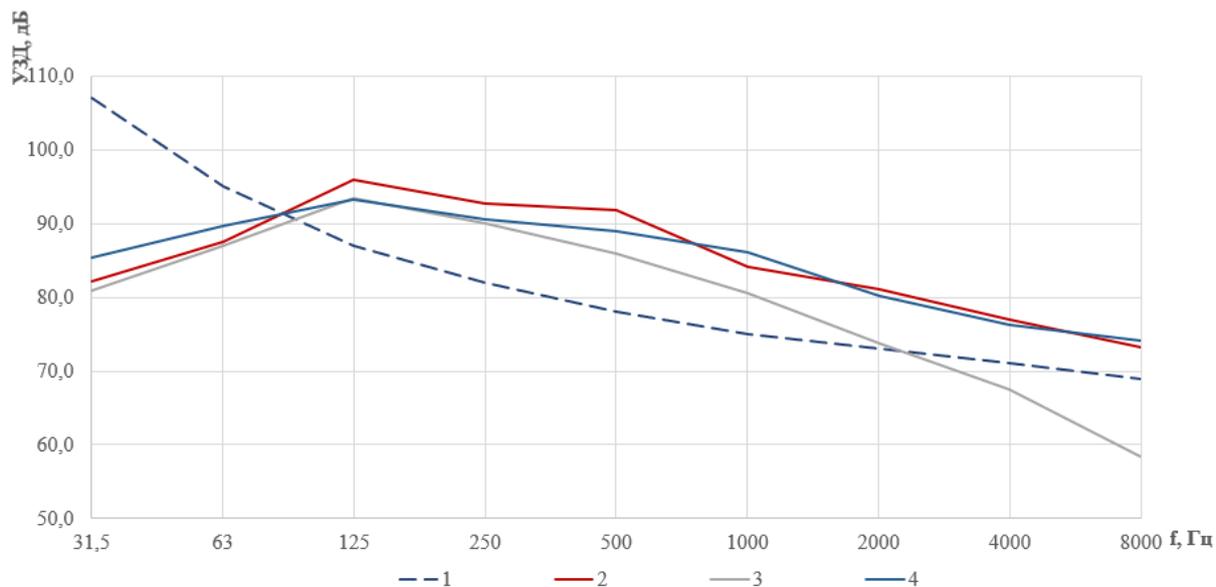


Рисунок 4 – Спектры шума на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами: 1 – санитарная норма; 2 – с включёнными двигателем, молотильным барабаном, вентилятором и роторами; 3 – с включёнными двигателем, молотильным барабаном, вентилятором, роторами и наклонной камерой; 4 – со всеми включенными технологическими агрегатами

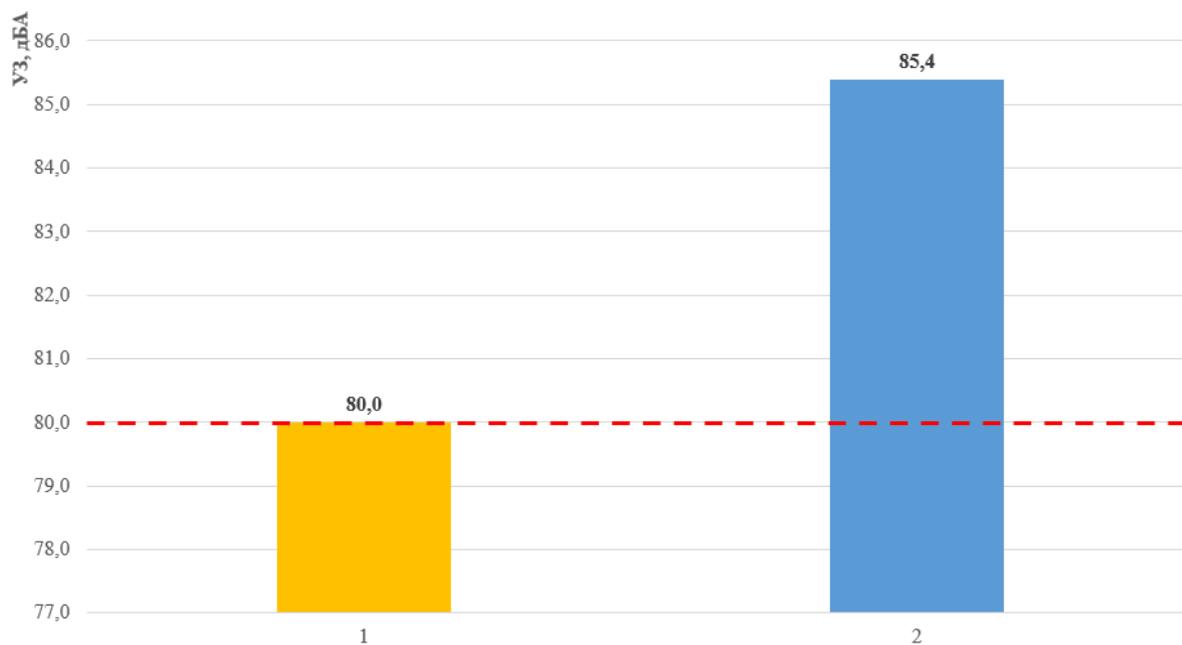


Рисунок 5 – Эквивалентные уровни звука на площадке выхода комбайна: 1 – санитарная норма; 2 – с включенным двигателем

Из измерений видно, что во всех случаях значения эквивалентных уровней звука превышают санитарную норму. Наибольшее значение эквивалентного уровня звука достигается в случае, когда всё оборудование комбайна включено, а именно кондиционер, двигатель, молотильный барабан, вентилятор, роторы, наклонная камера и равно 95,4 дБА, что превышает значение санитарной нормы на 15,4 дБА.

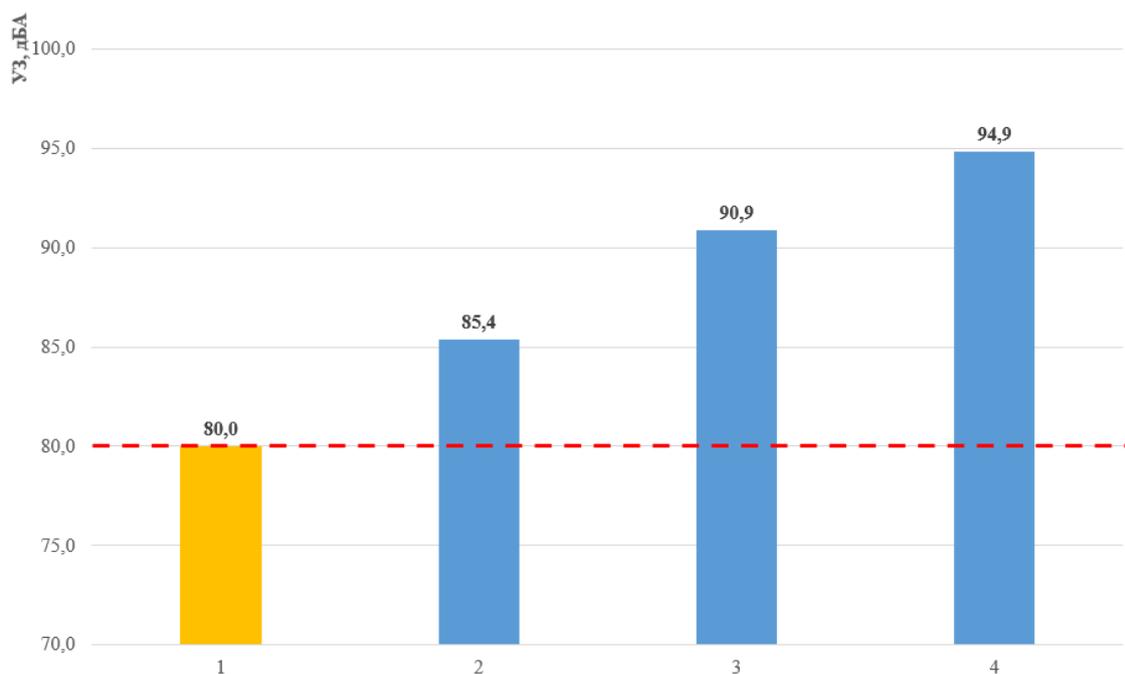


Рисунок 6 – Эквивалентные уровни звука на площадке выхода комбайна с установленными технологическими агрегатами: 1 – санитарная норма; 2 – с включённым двигателем, молотильным барабаном, вентилятором и роторами; 3 – с включённым двигателем, молотильным барабаном, вентилятором, роторами и наклонной камерой; 4 – со всеми включенными технологическими агрегатами

Проведённые исследования демонстрируют значительную зависимость уровня шума на площадке выхода комбайна от состава работающих технологических агрегатов. В режиме работы только двигателя спектральные характеристики не превышают санитарных норм во всех октавных полосах, однако эквивалентный уровень звука показывает превышение на 5,9 дБА.

При поэтапном включении рабочих органов – молотильного барабана, вентилятора, роторов, наклонной камеры и жатки – наблюдаются существенные превышения санитарных норм как в отдельных октавах (особенно на низких и средних частотах), так эквивалентного уровня звука. Максимальное превышение, достигающее 15,4 дБА, фиксируется при работе всех агрегатов одновременно.

Заключение

Проведённые исследования акустических характеристик на площадке выхода кормоуборочного комбайна показали, что уровень шума, создаваемый его работой, является значительным и в большинстве случаев превышает установленные санитарные нормы. В частности:

1. Без работающего оборудования наблюдается превышение санитарных норм по эквивалентному уровню звука. Максимальное значение эквивалентного уровня звука составило 85,9 дБА, что на 5,9 дБА выше допустимого значения (80 дБА).

2. При работе всех основных агрегатов (двигателя, молотильного барабана, вентилятора, роторов, наклонной камеры, жатки) уровень шума возрастает существенно. Максимальное значение достигает 95,4 дБА, что превышает норму на 15,4 дБА.

3. Наиболее значительные превышения наблюдаются в средне- и высокочастотных диапазонах (125–8000 Гц), что связано с работой режущих, измельчающих и вентиляционных устройств.

Таким образом, кормоуборочный комбайн является мощным источником шума, что создаёт риски для здоровья оператора и персонала, работающего вблизи техники. Несмотря на наличие шумоизолированной кабины, внешний шум остаётся значительным, особенно в условиях выполнения полевых работ.

Проведённые исследования подтверждают актуальность задачи снижения шумового воздействия сельскохозяйственной техники и необходимость учёта акустических факторов на этапах её проектирования и эксплуатации.

Список использованных источников

1. Çakmak B. et al. Vibration and noise characteristics of flap type olive harvesters// Applied Ergonomics. – 2011. – Vol. 42, № 3. – P. 397–402. – DOI: <https://doi.org/10.1016/2010.08.015>.
2. Шашурин А.Е. Снижение внутреннего шума звукоизолирующими кабинами: на примере строительно-дорожных машин : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.06. – СПб.: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2010. – 182 с.
3. Cecchini M. Noise Exposure, Prevention, and Control in Agriculture and Forestry: A Scoping Review // Safety. - 2024. - Vol. 55, N 1. - P. 15-28. - DOI: [10.3390/safety10010015](https://doi.org/10.3390/safety10010015).
4. Безручко А.Ф., Костенич В.Г., Бондаренко И.И., Жданович Д.Е. [и др.] Методика исследований шума агрегатов и систем трактора // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. - 2024. - N 2. - С. 141-146.
5. Jing J., Sun H., Liang R., Chen S. [et al.] Noise Testing of the Conveyor Trough Sprocket and Surface Noise Reduction Performance Evaluation of the Cavity Structure in a Combine Harvester // Agriculture. - 2025. - Vol. 15, N 12. – P. 1299. - DOI: [10.3390/agriculture15121299](https://doi.org/10.3390/agriculture15121299).
6. Barač Ž., Plaščak I., Radocaj D., Jurišić M. The Impact of Noise on Agricultural Tractor Operator in Relation to Certain Operational Parameters: An Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach // Proceedings of the 52nd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering". - Opatija, Croatia, 2025. - P. 1-16. - DOI: [10.3390/agriculture15050466](https://doi.org/10.3390/agriculture15050466).
7. Han H.-W., Kang M.-W., Lee S.-H., Seo Y.-H., Cho S.-J., Kim J.-G., Kim Y.-J., Park Y.-J. Root cause analysis of noise transfer in an entire tractor system using multi-layer operational transfer path analysis // Smart Agricultural Technology. - 2025. - Vol. 10, Article 100754. - DOI: [10.1016/j.atech.2024.100754](https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100754).
8. Analysis of earth-moving machines noise: A new method of separation of noise sources contributions / M. S. Atabekyan, N. I. Ivanov, G. M. Kurtsev [et al.] // 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 - Proceedings of the Institute of Acoustics, Edinburgh, 26–28 октября 2009 года. Vol. 31. – Edinburgh, 2009. – EDN RHQGEJ.
9. Stangl G. A., Porterfield J. G., Lowery R. L. Tractor Exhaust Noise Evaluation Technique// Transactions of the ASAE. – 1973. – Vol. 16, № 4. – P. 601–605. – DOI: [10.13031/2013.37581](https://doi.org/10.13031/2013.37581).
10. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания // Роспотребнадзор : [Электронный ресурс]. - URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf.
11. ГОСТ 12.1.003-2014 Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606>.

12. ГОСТ 12.2.019-2015 Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137155>.

References

1. Çakmak B. et al. Vibration and noise characteristics of flap type olive harvesters // Applied Ergonomics. – 2011. – Vol. 42, № 3. – P. 397–402. – DOI: <https://doi.org/10.1016/2010.08.015>.
2. Shashurin A.E. Snizhenie vnutrennego shuma zvukoizoliruyushchimi kabinami: na primere stroitel'no-dorozhnykh mashin : dis. ... kand. tekhn. nauk : 01.04.06. – SPb.: Izd-vo BGTU «VOENMEH», 2010. – 182 p.
3. Cecchini M. Noise Exposure, Prevention, and Control in Agriculture and Forestry: A Scoping Review // Safety. - 2024. - Vol. 55, N 1. - P. 15-28. - DOI: [10.3390/safety10010015](https://doi.org/10.3390/safety10010015).
4. Bezruchko A.F., Kostenich V.G., Bondarenko I.I., Zhdanovich D.E., [et al.] Methodology for Studying the Noise of Tractor Units and Systems // Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy. – 2024. – N 2. – P. 141-146.
5. Jing J., Sun H., Liang R., Chen S. [et al.] Noise Testing of the Conveyor Trough Sprocket and Surface Noise Reduction Performance Evaluation of the Cavity Structure in a Combine Harvester // Agriculture. - 2025. - Vol. 15, N 12. – P. 1299. - DOI: [10.3390/agriculture15121299](https://doi.org/10.3390/agriculture15121299).
6. Barač Ž., Plaščak I., Radocaj D., Jurišić M. The Impact of Noise on Agricultural Tractor Operator in Relation to Certain Operational Parameters: An Analytical Hierarchy Process (AHP) Approach // Proceedings of the 52nd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering". - Opatija, Croatia, 2025. - P. 1-16. - DOI: [10.3390/agriculture15050466](https://doi.org/10.3390/agriculture15050466).
7. Han H.-W., Kang M.-W., Lee S.-H., Seo Y.-H., Cho S.-J., Kim J.-G., Kim Y.-J., Park Y.-J. Root cause analysis of noise transfer in an entire tractor system using multi-layer operational transfer path analysis // Smart Agricultural Technology. - 2025. - Vol. 10, Article 100754. - DOI: [10.1016/j.atech.2024.100754](https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100754).
8. Analysis of earth-moving machines noise: A new method of separation of noise sources contributions / M. S. Atabekyan, N. I. Ivanov, G. M. Kurtsev [et al.] // 8th European Conference on Noise Control 2009, EURONOISE 2009 - Proceedings of the Institute of Acoustics, Edinburgh, 26–28 октября 2009 года. Vol. 31. – Edinburgh, 2009. – EDN RHQGEJ.
9. Stangl G. A., Porterfield J. G., Lowery R. L. Tractor Exhaust Noise Evaluation Technique // Transactions of the ASAE. – 1973. – Vol. 16, № 4. – P. 601–605. – DOI: [10.13031/2013.37581](https://doi.org/10.13031/2013.37581).
10. SanPiN 1.2.3685-21 Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans // Rospotrebnadzor : [Electronic resource]. - URL: https://www.rospotrebnadzor.ru/files/news/GN_sreda%20_obitaniya_compressed.pdf.
11. GOST 12.1.003-2014 Occupational Safety Standards System. Noise. General Safety Requirements // Techexpert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606>.
12. GOST 12.2.019-2015 Occupational Safety Standards System. Tractors and Self-Propelled Agricultural Machines. General Safety Requirements // Techexpert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200137155>.