

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ШУМА АГРЕГАТОВ И СИСТЕМ ТРАКТОРА**А. Ф. БЕЗРУЧКО, В. Г. КОСТЕНИЧ, И. И. БОНДАРЕНКО, Д. Е. ЖДАНОВИЧ***УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220023, e-mail: kaf.tia@bsatu.by***В. А. БЕЛОУСОВ***УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: ktrauto@tut.by**(Поступила в редакцию 11.03.2024)*

Одной из важнейших характеристик тракторов, определяющей их конкурентоспособность, спрос и цену на потребительском рынке, являются нормируемые уровни шума. Производителями тракторов, комбайнов и другой сельскохозяйственной техники постоянно проводятся работы по снижению уровня внешнего шума и шума на рабочем месте механизатора. Для достижения регламентируемых уровней шума машин с минимальными затратами и максимальным эффектом важно определить, какая из систем или какой агрегат является основным его источником, т.е. вносит максимальный вклад в общий шум трактора. Для определения показателей шума агрегатов или систем машины используются метод математического моделирования и экспериментальные методы.

В статье предложена методика исследований шума систем и агрегатов трактора. Данная методика разрабатывалась для снижения внешнего шума и шума на рабочем месте тракториста. Применение описанной методики возможно при наличии стенда для виброакустических исследований. Такой стенд был разработан и внедрен для тракторов «Беларус» и их агрегатов, он также может быть использован для исследований шума других самоходных машин. Стенд разработан с учетом требований ГОСТ по измерению шума в открытом звуковом поле, с возможностью загрузки и автономного привода отдельных агрегатов и систем трактора.

Предложенная методика измерений шума с использованием описанного стенда позволяет его определять с высокой достоверностью, разрабатывать и оценивать эффективность мероприятий по снижению шума агрегатов и систем трактора. Измерение шума от отдельных агрегатов и систем позволяет классифицировать их по вкладу во внешний шум трактора и шум на рабочем месте, а также разрабатывать мероприятия по снижению нормируемых уровней с минимальными затратами и максимальной эффективностью.

Ключевые слова: шум, трактор, двигатель, система выпуска отработанных газов, вентилятор системы охлаждения.

One of the most important characteristics of tractors, which determines their competitiveness, demand and price in the consumer market, is standardized noise levels. Manufacturers of tractors, combines and other agricultural machinery are constantly working to reduce the level of external noise and noise in the operator's workplace. To achieve regulated noise levels of machines with minimal costs and maximum effect, it is important to determine which of the systems or which unit is its main source, i.e. makes the maximum contribution to the overall noise of the tractor. To determine the noise indicators of machine units or systems, mathematical modeling and experimental methods are used.

The article proposes a methodology for studying the noise of tractor systems and units. This technique was developed to reduce external noise and noise at the tractor driver's workplace. The application of the described technique is possible if there is a stand for vibroacoustic research. Such a stand was developed and implemented for Belarus tractors and their units; it can also be used to study the noise of other self-propelled machines. The stand is designed taking into account the requirements of GOST for measuring noise in an open sound field, with the ability to load and autonomously drive individual units and systems of the tractor.

The proposed method for measuring noise using the described stand makes it possible to determine it with high reliability, develop and evaluate the effectiveness of measures to reduce the noise of tractor units and systems. Measuring noise from individual units and systems makes it possible to classify them according to their contribution to the external noise of the tractor and noise in the workplace, and also to develop measures to reduce standard levels with minimal costs and maximum efficiency.

Key words: noise, tractor, engine, exhaust system, cooling system fan.

Введение

Шум отдельных агрегатов и систем тракторов не регламентируется законодательными актами, а внешний шум трактора и шум на рабочем месте тракториста регламентирован ГОСТами [1, 2]. Работы по улучшению указанных характеристик ведутся производителями постоянно. Для достижения регламентируемых уровней шума машин с минимальными затратами и максимальным эффектом важно определить, какая из систем или какой агрегат является основным источником, т.е. даёт максимальный вклад в общий шум трактора. Для определения показателей шума агрегатов или систем машины используют как метод математического моделирования, так и экспериментальные методы.

Метод математического моделирования описан в работах Разумовского М. А. [3, 4], Клюкина И. И. [5], Долотова А. А. [6]. Данный метод эффективен на стадии проектирования и требует экспериментального подтверждения полученных результатов, что часто становится сложной задачей, а в условиях производства – приоритетной. Для её решения исследователи разрабатывают методики и

подбирают оборудование для каждого конкретного случая отдельно [3, 5, 6...14]. Условно экспериментальные методы анализа можно разделить на качественные и количественные. Качественный метод основан на сравнительном анализе спектров различных источников. Спектры для такого анализа получают двумя методами:

- возбуждением от внешнего маломощного возбудителя, что даёт только качественную характеристику предполагаемого реального спектра и не даёт даже относительной количественной оценки;
- измерением вибрации в диапазоне звуковых частот, что позволяет получить только часть спектра до 2 кГц, при этом шум оценивают в диапазоне до 20 кГц.

Вышеописанные методы анализа дают возможность только предположить возможные источники шума с большой вероятностью возможной ошибки.

Количественный анализ значительно точнее и информативнее качественного и позволяет получать абсолютные уровни шума по всему спектру частот. Методы проведения такого анализа заключаются в отключении исследуемого источника с последующим анализом спектра до и после отключения.

Ещё один метод можно назвать экспериментально-аналитическим. Суть данного метода заключается в выделении исследуемого источника. Например, шум топливного насоса дизельного двигателя можно определить методом выделения, обеспечив ему привод от маломощного электродвигателя. Однако шум системы выпуска таким методом выделения определить невозможно, так как двигатель должен работать. В данном случае возможно применение метода выделения путём снижения влияния шума от других источников в точке оценки шума выпуска.

Для измерения шума также требуется выполнение условий к звуковому полю в месте измерений, которые указаны в ГОСТах [14, 15]. Ввиду множества факторов, влияющих на точность измерения шума, в стандарте указано, что «Пользователь стандарта должен определить необходимую точность и выбрать соответствующий метод измерений» [14]. В соответствии со стандартом испытательное пространство должно отвечать требованиям, которые зачастую затруднительно выполнить, а определение уровня звукового давления излучения точным или техническим методом возможно в заглушённых [16] и реверберационных камерах [17] в открытом звуковом поле (пространстве) [15, 18, 19] над звукоотражающей плоскостью, где нет объектов отражения звука.

Заглушённая камера – это звукоизолированное помещение с заданными габаритными размерами объёма в 100 и более раз больше объёма исследуемого объекта и внутренними поверхностями стен, покрытыми специальным звукопоглощающим материалом. Такая камера имитирует распространение звуковых волн в условиях, аналогичных свободному полю.

Реверберационная камера (звонкая, диффузная) – помещение, в котором звук по возможности полностью отражается от ограждающих поверхностей и в каждой точке которого звуковое давление в среднем одинаково, а приход звуковых волн с разных направлений равновероятен. Стены реверберационной камеры изготавливают из железобетона и кирпича (для изолирования от внешних шумов), а внутреннюю поверхность камеры облицовывают материалами с минимальным звукопоглощением (высокомарочным цементным раствором, мрамором и др.). Диффузность звукового поля достигается неправильностью формы реверберационной камеры (непараллельность ограждающих поверхностей, специально созданные неровности на стенах), а также развешиванием в них в случайном порядке отражающих элементов в виде изогнутых пластин. Объём реверберационных камер должен быть в пределах от 200 до 300 м³. Допускается применение камер меньшего объёма при ограничении частотного диапазона измерений. Отношение наименьшей стороны камеры к наибольшей не должно превышать 1:3.

В заглушённых и реверберационных камерах в период измерения температура, влажность и барометрическое давление воздуха не должны существенно изменяться, а также должна быть исключена вибрация.

Основные достоинства заглушённых и реверберационных камер заключаются в возможности проводить исследования вне зависимости от погодных условий и возможности исследований шума маломощных источников звука.

Открытое звуковое поле – это открытое пространство над звукоотражающей плоскостью (асфальт, бетон), где нет объектов, отражение звука от которых влияет на результат измерения.

Измерение шума в открытом звуковом поле, как правило, проводят для источников с относительно большими габаритными размерами и относительно высокими уровнями звуковой мощности. Трактор и его агрегаты можно отнести к таковым. Для достоверных измерений в открытом звуковом поле также требуется выполнить ряд условий [15, 18]:

- уровень фонового шума должен быть ниже уровня шума исследуемого источника на 10 и более дБА для точного метода;
- измерения не следует выполнять при осадках (дождь, град) или скорости ветра свыше 4 м/с;
- расстояние от точек измерений до посторонних отражающих звук предметов и ограждений превышает удвоенные размеры измерительных поверхностей или удвоенный радиус измерительной поверхности R.

Целями данной работы являются:

- разработка методики измерения уровней звукового давления источников шума трактора, что позволит определить степень их влияния на нормируемые действующими стандартами показатели внешнего шума и шума в кабине;
- разработка стенда для виброакустических исследований уровней звукового давления основных источников шума трактора с минимальными затратами и максимальной эффективностью.

Основная часть

Применение описанной ниже методики возможно при наличии стенда для виброакустических исследований. Такой стенд был разработан и внедрен для тракторов «Беларус» и их агрегатов, он также может быть использован для исследований других самоходных машин. Стенд разработан с учетом требований ГОСТ по измерению шума в открытом звуковом поле, с возможностью загрузки и автономного привода отдельных агрегатов и систем трактора.

Исходя из имеющихся на сегодняшний день данных о внешнем шуме трактора и вышеуказанных требований по измерению шума, можно провести предварительный расчет допустимого уровня фонового шума в зоне установки микрофона на этапе проектирования стенда. Уровень шума выпускаемых современных тракторов находится в пределах 80–90 дБА и измеряется на расстоянии 7,5 м от оси трактора при его разгоне [1]. Радиус измерительной поверхности (точки установки микрофона) при точном методе измерений должен быть больше или равен удвоенному размеру огибающего параллелепипеда. Размер параллелепипеда соответствует габаритным размерам источника [19]. Исходя из этих условий, уровень фонового шума в точке оценки шума агрегатов можно определить из выражения:

$$L_{\text{фд}} = L_{\text{н}} + 10 \cdot \lg \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{и}}} - \Delta, \text{ дБА}, \quad (1)$$

где $L_{\text{фд}}$ – допустимый уровень фонового шума, дБА; $L_{\text{н}}$ – действительный уровень шума машины, дБА; $D_{\text{н}}$ – дистанция от оси проверяемой по шуму машины до точки установки микрофона, м; $D_{\text{и}}$ – дистанция от оси проверяемого по шуму агрегата или системы до точки установки микрофона, м; Δ – поправка на точность измерений, дБА.

Например, для проверки влияния шума двигателя принимаем следующие значения:

$\Delta = 10$ дБА, что соответствует точному методу измерений; $D_{\text{н}} = 1,5$ м; $D_{\text{и}} = 7,5$ м. Значение $L_{\text{н}} = 80$ дБА примем в соответствии с перспективными планами ОАО «МТЗ» по улучшению виброакустических характеристик производимых тракторов. По действующим ГОСТам уровень внешнего шума не должен превышать 85 дБА для тракторов с эксплуатационной массой, не превышающей 1500 кг и 89 дБА – для тракторов с эксплуатационной массой (без балласта), превышающей 1500 кг.

Получим $L_{\text{фд}} = 63$ дБА.

Перед измерением шума тракторного двигателя необходимо измерить фоновый шум, и он не должен превышать 63 дБА. Действительный уровень фонового шума на построенной площадке не превышал 55 дБА.

Для проверки других агрегатов и систем необходимо рассчитать для них $L_{\text{фд}}$ и сопоставить с измеренным фоновым шумом.

Измерения проводятся в открытом звуковом поле на бетонной площадке площадью 130 м². На рис. 1 показан стенд для исследования шума тракторных двигателей с установленным на нём двигателем Д-243.

Для создания нагрузки на двигатель применён электромагнитный порошковый тормоз 1. Источниками его шума являются два радиальных подшипника, электромагнитное поле и проходящая через него вода для охлаждения. Расчётный уровень шума тормоза менее 40 дБА, что значительно ниже даже фонового шума. Для исключения влияния шума систем впуска и выпуска забор воздуха и выброс отработавших газов отведены за пределы измерительной площадки. Отводы 2, 4 сделаны из толстостенных стальных труб, обладающих хорошей звукоизоляцией, и не влияют на наполнение

цилиндров за счёт увеличенного внутреннего диаметра. Агрегаты системы охлаждения (радиатор в сборе и вентилятор с приводом от электродвигателя) установлены на тележку, расположенную также за пределами площадки, и соединены с двигателем трубопроводами 5. Для предотвращения возможного непредсказуемого влияния вибрации двигатель и тормоз установлены на сварную стальную раму, которая соединена с бетонным основанием анкерными болтами.

Приборы контроля и управления двигателем и шумоизмерительная аппаратура располагаются в закрытом отопляемом помещении, находящемся за пределами измерительной площадки.

Описанная компоновка стенда позволяет:

- исследовать шум, создаваемый кривошипно-шатунным и газораспределительным механизмами, в зависимости от качества сборки и балансировки;
- оценить влияние на шум угла опережения впрыска и форсирование двигателя по частоте вращения или крутящему моменту.

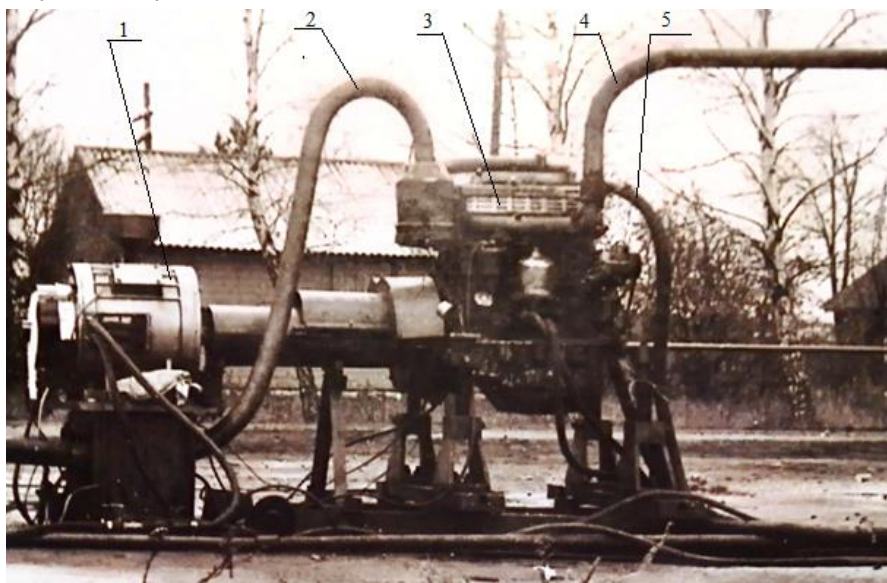


Рис. 1. Стенд для исследования шума тракторных двигателей:

- 1 – электромагнитный порошковый тормоз ПТ-250; 2 – труба подачи воздуха в двигатель; 3 – двигатель Д-243;
4 – труба отвода выпускных газов; 5 – труба подачи воды для охлаждения двигателя

Расположение микрофона и режимы работы двигателя выбирались по методике ОСТ 23.1.446-82 [20] и рекомендациям [5]. Шум процесса впуска измерялся на выходе из трубы 2, микрофон располагался в точке на расстоянии 0,5 м от среза трубы по линии, расположенной под углом 60° к оси трубы.

Для измерений шума выпуска и определения эффективности глушителя труба отвода выхлопных газов 4 демонтируется. При данных измерениях проводится три замера:

- с глушителем, микрофон в точке на расстоянии 0,25 м от среза выпускной трубы по линии, расположенной под углом 60° к оси потока газов;
- измерение фона создаваемого шумом двигателя производят в той же точке, при этом выхлопные газы отводятся через трубу 4;
- вместо глушителя устанавливается равновеликая ему по длине прямая труба с внутренним диаметром равным диаметру выходного отверстия глушителя. Микрофон также выставляется в точке на расстоянии 0,25 м от среза трубы по линии, расположенной под углом 60° к оси потока газов.

Измерение фонового шума в точке замера шума выхлопа позволяет вычислить точное значение шума выпускной системы. Если разность между измеренным уровнем шума и фоновым уровнем больше 3 дБА, но не превышает 10 дБА, то для оценки шума источника необходимо делать поправку на фон. Поправка к измеренному значению вычисляется по формуле:

$$\Delta L_{\phi} = -10 \cdot \lg(1 - 10^{-0,1(L_{\text{гн}} - L_{\phi})}), \text{ дБА}, \quad (2)$$

где L_{ϕ} – уровень фонового шума, дБА; $L_{\text{гн}}$ – измеренный уровень шума у среза на выходе из глушителя, дБА.

Уровень шума системы выпуска с глушителем:

$$L_{\text{вс}} = L_{\text{гн}} - \Delta L_{\phi}, \text{ дБА}. \quad (3)$$

Измерение шума на срезе равновеликой прямой трубы позволяет оценить эффективность глушителя $\Delta L_{\text{гл}}$ как разницу между измеренным шумом на прямой трубе $L_{\text{т}}$ и уровнем шума системы выпуска с глушителем $L_{\text{вс}}$:

$$\Delta L_{\text{гл}} = L_{\text{т}} - L_{\text{вс}}, \text{ дБА.} \quad (4)$$

При измерениях шума двигателя, а также шума его систем выпуска и выпуска, двигатель нагружается до номинальной мощности.

Для измерения шума вентилятора всё оборудование в центре площадки демонтируется, а в её центре размещается тележка с системой охлаждения. Привод вентилятора регулируется на частоту вращения вентилятора, соответствующую его частоте вращения при номинальной частоте вращения двигателя. Микрофон располагается слева и справа по поперечной оси радиатора на расстоянии от его крайней точки, соответствующем удвоенному размеру огибающего параллелепипеда.

Измерение шума трансмиссии на стенде также возможно, но требует наличия малошумного, достаточно мощного устройства привода трансмиссии (соответствующего номинальной мощности двигателя, работающего с данной трансмиссией) и установки второго электромагнитного порошкового тормоза ПТ-250 (для торможения через две полуоси одновременно). Однако такой метод определения шума трансмиссии будет нерациональным. Предпочтителен в данном случае расчёт, для выполнения которого измеряют внешний шум трактора по методике ГОСТ [1], а затем пересчитывают шум от ранее определенных источников в точке 7,5 м от оси трактора:

$$L_{7,5} = L_{\text{и}} + 10 \cdot \lg \frac{D_{7,5}}{D_{\text{иа}}}, \text{ дБА,} \quad (5)$$

где $L_{7,5}$ – уровень шума от источника на тракторе на расстоянии 7,5 м от оси трактора, дБА; $D_{7,5} = 7,5$ м; $D_{\text{иа}}$ – дистанция между точкой 7,5 м от оси трактора и условной точкой расположения микрофона при замере шума агрегата (системы), установленного на тракторе, м.

Суммарный уровень шума $L_{\Sigma 7,5}$ в точке 7,5 м от всех источников шума на тракторе с известным уровнем шума $L_{7,5}$ определяются из выражения:

$$L_{\Sigma 7,5} = 10 \cdot \lg \Sigma 10^{0,1L_{7,5i}}, \text{ дБА.} \quad (6)$$

Отсюда уровень шума трансмиссии в точке 7,5 м:

$$L_{\text{транс.}} = 10 \cdot \lg \left(10^{0,1L_{\text{тр}}} - 10^{0,1L_{\text{дв.р}}} - 10^{0,1L_{\text{вып.р}}} - 10^{0,1L_{\text{вп.р}}} - 10^{0,1L_{\text{ох.р}}} \right), \text{ дБА.} \quad (7)$$

где $L_{\text{дв.р}}$, $L_{\text{вып.р}}$, $L_{\text{вп.р}}$, $L_{\text{ох.р}}$ – рассчитанные, соответственно, для точки 7,5 м от оси трактора шум двигателя, выпускной системы, системы впуска, системы охлаждения, дБА; $L_{\text{тр}}$ – шум трактора, измеренный по ГОСТ [1], дБА.

Заключение

1. Предложенная методика измерений шума с использованием описанного стенда позволяет его определять с высокой достоверностью, разрабатывать и оценивать эффективность мероприятий по снижению шума агрегатов и систем трактора.

2. Измерение шума от отдельных агрегатов и систем позволяет классифицировать их по вкладу во внешний шум трактора и шум на рабочем месте, а также разрабатывать мероприятия по снижению нормируемых уровней с минимальными затратами и максимальной эффективностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тракторы сельскохозяйственные и лесохозяйственные. Внешний шум. Нормы и методы оценки: ГОСТ Р 51920-2002. – введ. 12.07.02 – М: Госстандарт России – 6 с.
2. Система стандартов безопасности труда. Тракторы и машины самоходные сельскохозяйственные. Общие требования безопасности: ГОСТ 12.2.019–2015 – введ. 01.07.17 – М.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации – 19 с.
3. Разумовский М. А. Борьба с шумом на тракторах. – Минск: Наука и техника, 1973. – 208 с.
4. Разумовский М. А. Прогнозирование шумовых характеристик поршневых двигателей. – Минск: Вышэйшая школа, 1981. – 40 с.
5. Ключкин И. И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. – 2 изд. – Л.: Судостроение, 1971. – 416 с.
6. Долотов А. А. Вероятностная оценка шумности легковых автомобилей: дисс... канд. техн. наук: 2.5.11. – Волгоград, 2022 – 169 с.
7. Лопашев Д. З., Осипов Г. Л., Федосеева Е. Н. Методы измерения и нормирования шумовых характеристик. – М.: Издательство стандарт, 1983. – 232 с.
8. Seidel, H. Long-term effects of whole-body vibration a critical survey of the literature / H. Seidel, R. Heide – Int Arch Occup Environ Health, 1986; 58 (1) – 1–26 p.

9. Serridge, M. Theory and Application handbook. Piezoelectric accelerometer and vibration preamplifiers / M. Serridge, R. Licht. – Narum: Bruel&Kjaer, 1987. – 150 p.
10. Шатров, М. Г. Шум автомобильных двигателей внутреннего сгорания – М. Г. Шатров, А. Л. Яковенко, Т. Ю. Кричевская. – М.: МАДИ, 2014. – 69 с.
11. On separation of vehicle noise for limit setting in future legislation: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary / C. Thron, S. Leth, B. Stegemann – Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary – Design – (2015), 126, 31–38 p.
12. Tsuji, H. Experimental method extracting dominant acoustic mode shapes for automotive interior acoustic field coupled with the body structure /H. Tsuji, S. Maruyama, T. Yoshimura, E. Takahashi – SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems, 2013, 6 (2).
13. Research on noise testing and analysis of an automatic transmission / W. Zhan, J. Wu, F. Shao, C. Huang (2013) – Lecture Notes in Electrical Engineering, 201 – LNEE (VOL. 13), 599–605 p.
14. Определение уровней звукового давления излучения на рабочем месте и в других контрольных точках в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью: ГОСТ ISO 11201-2016. – Взамен ГОСТ 31172-2003 (ИСО 11201:1995) – введен 01.11.17 – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации – 33 с.
15. Система стандартов безопасности труда. Техника сельскохозяйственная. Методы оценки безопасности: ГОСТ 12.2.002-2020. – Взамен ГОСТ 12.2.002-91; введен РБ 01.11.2021 – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации – 54 с.
16. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полуглушенных камер: ГОСТ ISO 3745-2014 – Введен 01.11.15 – М.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации – 59 с.
17. Определение уровней звуковой мощности по звуковому давлению Точные методы для реверберационных камер: ГОСТ 31274-2004 – Введен 01.10.05– М.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации – 28 с.
18. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. Технический метод: ГОСТ 12.1.026-80 – Введен 01.07.81 – М.: Государственный комитет СССР по стандартам – 10 с.
19. Шум машин. Измерение уровней звукового давления излучения на рабочем месте и в других контрольных точках. Метод с коррекциями на акустические условия: ГОСТ 30683-2000 (ИСО 11204-95) – Введен 01.01.03 – Мн.: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации – 20 с.
20. Дизели тракторные и комбайновые. Предельные значения шумовых и вибрационных характеристик. Методы определения: ОСТ 23.1.446-82 ССБТ – Введен 01.01.84 – Министерство тракторного и сельскохозяйственного машиностроения – 33 с.