

## ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ КРУГЛЫХ ПИЛ НА ИХ ЗВУКОВУЮ МОЩНОСТЬ ПРИ РЕЗАНИИ ДРЕВЕСИНЫ

Старжинский В.Н.<sup>1</sup>, Совина С.В.<sup>1</sup>, Тракало С.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург, Россия (620075, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37), e-mail: vsn@usfeu.ru;

<sup>2</sup>Частное учреждение Федерации независимых профсоюзов России «Научно-исследовательский институт охраны труда в г.Екатеринбурге» (620075, Екатеринбург, Толмачева,11), e-mail: trakalo@yandex.ru

---

Круглопильные станки относятся к разряду наиболее шумного деревообрабатывающего оборудования, уровни звука которых на рабочих местах достигают 110-115дБА. Рабочий орган – круглая дисковая пила, которая является основным источником шума станка. Теоретический анализ возникновения шума при резании древесины дисковой пилой показывает, что уровень излучаемой звуковой мощности зависит от уровня колебательной скорости пилы и коэффициента излучения. Явление излучения звука при изгибных колебаниях пластин имеет сложный характер. Во многих случаях эти сложные процессы можно свести к упрощенным моделям, что облегчает анализ зависимостей между параметрами процесса излучения и характеристиками источника колебаний и позволяет наметить рациональные пути ослабления звукоизлучения, чему и посвящена предлагаемая работа.

---

Ключевые слова: пильный диск, уровень звуковой мощности, уровень колебательной скорости, коэффициент излучения, критическая частота.

## INFLUENCE CIRCULAR SAWS EMITTING COEFFICIENT ON THEIR SOUND POWER DURING WOOD CUTTING

Starzhinsky V.N.<sup>1</sup>, Sovina S.V.<sup>1</sup>, Trakalo S.Y.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Ural state forest Engineering University, Ekaterinburg, Russia (620100, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Siberian tract, 37), e-mail: vsn@usfeu.ru;

<sup>2</sup>Private organization of Federation of Independent Trade-Unions of Russia "Scientific-Research Institute for Labor Protection in Yekaterinburg" (620075, Sverdlovsk region, Yekaterinburg, Tolmacheva, 11), e-mail: trakalo@yandex.ru

---

Circular saws are classified as the noisiest of woodworking equipment, sound levels in the workplace can reach 110-115 dBA. The working body – round saw blade, which is the main source of noise machine. Theoretical analysis of the occurrence of noise when cutting wood with a circular saw shows that the emitting level of sound power level depends on the vibrational speed saws and emissivity. The phenomenon of sound emission for flexural vibrations of plates has a complicated character. In many cases, these complex processes can be reduced to a simplified model, which facilitates the analysis of the relationships between process emission parameters and characteristics of the source of vibrations and allows to identify efficient ways of reducing sound emission, which is devoted to the proposed work.

---

Keywords: saw blade, sound power level, the level of vibrational rate, emissivity, critical frequency.

При разработке мероприятий по снижению шума крупных пил важно знать, от каких параметров конструкции пилы зависит излучаемая пилой звуковая мощность.

Цель настоящей работы – дать обоснование влияния коэффициента излучения шума пилы на звуковую мощность станка.

Диск пилы представляет собой однородную изотропную круглую пластину, ограниченную двумя концентрическими окружностями.

Явления излучения звука при колебаниях пилы имеют сложный характер. Во многих случаях эти сложные реальные процессы и источники можно свести к упрощенным моделям. Последнее облегчает анализ зависимостей между параметрами процесса излучения и

характеристиками источника колебаний и позволяет наметить рациональные пути ослабления звукоизлучения.

Излучение источника с заданным распределением скорости колебаний принято выражать коэффициентом излучения [4;5]:

$$\sigma = \frac{P}{\rho c s \bar{v}^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – звуковая мощность, Вт;

$s$  – площадь поверхности излучения (диска пилы), м<sup>2</sup>;

$\bar{v}^2$  – среднее значение колебательной скорости диска пилы, м/с;

$\rho$  – плотность среды (воздуха), кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – скорость звука, м/с.

Переходя к шкале звуковых уровней, из уравнения (1) получим:

$$L_p = L_v + 10 \lg S + 10 \lg \sigma \text{ дБ}, \quad (2)$$

где  $L_p$  – уровень звуковой мощности (относительно 10<sup>-12</sup> Вт), дБ;

$L_v$  – средний уровень колебательной скорости по площади диска пилы (относительно 5\*10<sup>-8</sup> м/с).

Для нахождения уровней звуковой мощности, излучаемой пилой, нужно определить уровни колебательной скорости и коэффициент излучения.

Влияние площади поверхности пилы на излучаемую звуковую мощность подтверждает полученную ранее зависимость в работе [5]: изменение площади в 2 раза дает изменение уровня звука на 3 дБ.

Слагаемое  $10 \lg \sigma$  определяет механизм перехода вибраций диска пилы в акустическую энергию шума.

Влияние этого слагаемого требует дополнительного самостоятельного исследования.

Для рассмотрения влияния члена  $10 \lg \sigma$  на излучаемую пилой звуковую мощность необходимо обратиться к теории излучения звука при изгибных колебаниях пластин.

Впервые излучение звука при изгибных колебаниях пластин было рассмотрено Кремером Л., который ввел понятие коэффициента излучения  $\sigma$ , характеризующего интенсивность излучения при изгибных колебаниях пластин через отношение ее к интенсивности излучения при поршневых колебаниях пластины с такой же эффективной амплитудой  $\bar{v}^2$  [1].

Им же получена формула зависимости коэффициента излучения бесконечной пластины от соотношения изгибной волны в пластине  $\lambda_{\text{и}}$  и длины звуковой волны в воздухе  $\lambda$  в виде:

$$\sigma = \left(1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_M^2}\right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Выражение (3) устанавливает основную закономерность, характеризующую зависимость интенсивности излучения от частоты при изгибных колебаниях пластин (рис. 1)

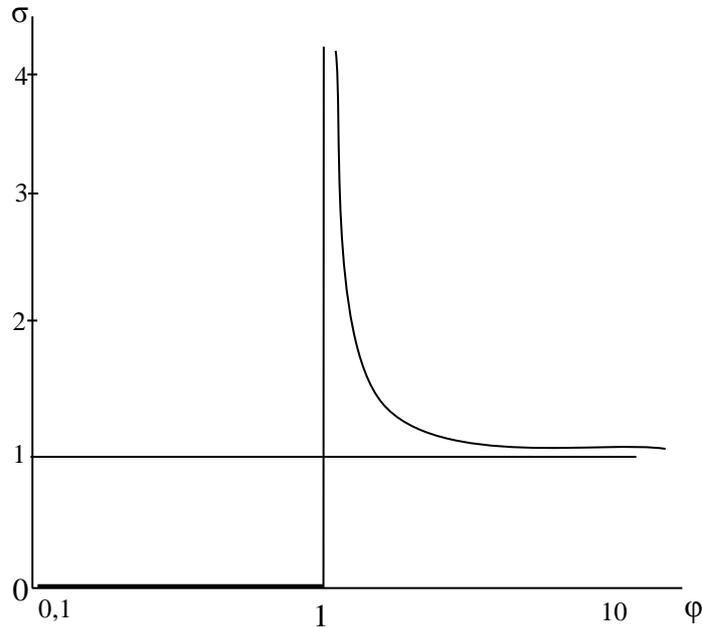


Рис.1. Кривая зависимости коэффициента излучения при изгибных колебаниях бесконечных пластин ( $\varphi=f/f_{кр}=\lambda^2_u/\lambda^2$ )

При  $\lambda_M < \lambda$  коэффициент излучения  $\sigma = 0$ , т.е. отдача энергии в среду отсутствует. Взаимодействие пластины со средой сводится в этом случае к образованию ближнего поля, обусловленному наличием некоторой соколеблющейся массы среды, так как возмущение от смежных участков пластины, колеблющихся в противофазе, взаимно компенсируются. Для характеристики этого явления иногда используют термин «акустическое короткое замыкание». Излучение имеет место при  $\lambda_M > \lambda$ . При  $\lambda_M > \lambda$ ,  $\sigma \rightarrow 1$ , а при  $\lambda_M \rightarrow \lambda$  сопротивление излучения бесконечно возрастает. Условие  $\lambda_M = \lambda$  является граничным условием между двумя областями частот, принципиально отличающихся по характеру излучения. Это условие формально всегда имеет место, так как по элементарной теории изгиба пластин  $\lambda_M$  изменяется пропорционально  $f^{-1/2}$ , а  $\lambda$  пропорционально  $f^{-1}$  ( $f$  – частота звука).

Для каждой пластины условие  $\lambda_M = \lambda$  соответствует вполне определенному значению частоты. Эту частоту, называемую критической, можно вычислить в общем случае по формуле:

$$f_{кр} = \frac{c^2}{\pi\delta} \sqrt{\frac{3p(1-\mu^2)}{E}} \approx \frac{c^2}{1,8\delta\alpha_{II}}, \quad (4)$$

Где  $p$ ,  $\delta$ ,  $E$ ,  $\mu$  – плотность, толщина пластины, модуль Юнга и коэффициент Пуассона пластины (пилы) соответственно.

Выражение (3) характеризует лишь принципиальную зависимость излучения от частоты при изгибных колебаниях пластин. Для практических расчетов дисковых пил оно не может быть использовано вследствие чрезмерной идеализации реальных условий. В первую очередь это относится к размерам излучающих дисковых пил, которые на практике всегда ограничены.

У пилы из-за ограниченности размеров наблюдается заметное излучение и в области частот ниже критической частоты, что объясняется неполной компенсацией вытесняемого и перемещаемого обратно при колебаниях диска пилы объемов соседних участков среды.

Излучение хотя и ослабленное, происходит и в области  $f < f_{кр}$ , а максимум при  $f \approx f_{кр}$  имеет конечную величину. На частотах  $f > f_{кр}$  интенсивность излучения практически не зависит от размеров пластины и граничных условий на ее контуре.

Другим фактором, сближающим уровни излучаемого звука на высоких и низких частотах, является демпфирование колебаний изгиба в пластине вследствие внешнего или внутреннего трения [3]. Ввиду затухания колебаний в диске пилы, заметное излучение происходит лишь с ограниченного участка пилы, а это сопровождается появлением излучения в докритической области частот.

На частотах  $f$ , лежащих в пределах:

$$f_0 < f < f_{кр}, \quad (5)$$

где  $f_0$  – некая величина, имеющая размерность частоты и равна  $f_0 = \frac{c}{b}$  ( $c$  – скорость звука,  $b$  – размер диска пилы в направлении распространения волны изгиба, равный диаметру пилы  $D$ ). Коэффициент излучения может быть представлен в виде [2;1]:

$$\sigma = 10 \lg \frac{1}{\pi} \frac{f_0}{f_{кр}}. \quad (6)$$

Для стальной пластины в воздухе:

$$\sigma = 10 \lg \frac{1}{\pi} \frac{c}{b} \frac{\delta}{1250}, \quad (7)$$

где размеры  $\delta$  и  $b$  даны в см, а скорость звука в см/сек.

Отсюда видно, что в определенных пределах частот звуковая энергия, излучаемая колеблющейся пилой в воздух, пропорциональна толщине диска пилы. Это следует учитывать при сравнительной оценке вклада, вносимого в звукоизлучение дисками круглых пил при одинаковой амплитуде.

В табл. 1 приведены результаты расчетов по формуле (7) коэффициентов излучения дисковых пил различных диаметров ( $D$ ) и толщин  $\delta$ .

Таблица 1

## Коэффициенты излучения дисковых пил

<b><i>D</i>, мм</b>	150		200		250		300	
<i>δ</i> , мм	1,8	2,2	1,8	2,2	2,2	2,4	2,2	2,6
<i>f</i> <sub>кр</sub> , Гц	7000	5500	7000	5500	5500	5000	5500	4800
$f_0 = \frac{c}{D}$ , Гц	2267		1700		1360		1133	
<i>σ</i> , дБ	-9,8	-9,0	-11,1	-10,2	-11,2	-10,8	-12,0	-11,2
<b><i>D</i>, мм</b>	400		450		500		1000	
<i>δ</i> , мм	2,6	3,0	3,0	3,2	3,8	4,2	4,4	5,0
<i>f</i> <sub>кр</sub> , Гц	4800	4450	4450	3200	3200	2800	2600	2500
$f_0 = \frac{c}{D}$ , Гц	850		756		680		340	
<i>σ</i> , дБ	-12,5	-11,9	-12,4	-12,1	-11,8	-11,4	-14,2	-13,6

Для реальных условий закрепления краев пилы влияние их на интенсивность излучения невелико. В предельном случае (жестко заземленные кромки) различие по сравнению со свободной опорой составляет 3 дБ.

Приведенные выше соотношения характерны для излучения звука пластинами в тех случаях, когда задана колебательная скорость или амплитуда колебаний пластин. Если задана локальная возмущающая сила или возмущающий момент, то характер излучения будет иным, поскольку колебательная скорость по поверхности пластины не будет постоянной.

Звуковое излучение диска пилы определяется тремя составляющими:

- первая составляющая совпадает с полем излучения бесконечной пластины;
- вторая составляющая возбуждается краями диска пилы. Если пренебречь искажениями поля на краях пилы, считая амплитудное распределение строго синусоидальным, то краевым эффектом можно пренебрегать на свободных краях диска пилы;
- третья составляющая – это звук, связанный с искажениями поля колебаний в окрестности точки возбуждения (точки приложения силы).

Искажение поля колебаний возбуждающей силой вызывают дополнительное объемное смещение. В двумерном случае применим модифицированный принцип Гюйгенса. Точечная сила возбуждает расходящиеся изгибные волны; следующие одна за другой круговые зоны шириной в половину длины изгибной волны имеют противоположную фазу. Вклады любых двух соседних половин таких зон в звуковое излучение взаимно уничтожаются. Тогда звуковая мощность оказывается обусловленной объемным потоком,

который возбуждается первой половиной круговой зоны, остающейся в результате такой взаимной компенсации.

В том случае, когда внешняя сила представляет собой точечную или линейную силу, возбуждаются колебания практически всех форм собственных колебаний системы. Возбуждаются и низкие формы собственных колебаний, резонансные частоты которых значительно ниже частоты силы. Для этих форм собственных колебаний расстояние между узловыми линиями значительно больше половины длины звуковой волны. Они акустически не короткозамкнуты, и их сопротивление излучения близко к  $pc$ .

С практической точки зрения на высоких частотах нет большой разницы, возбуждается ли диск пилы точно в центре или на каком-то расстоянии от него. Звуковая мощность будет почти такой же.

Резюмируя вышесказанное в отношении излучения звука дисковой пилой, можно сделать следующие выводы.

На холостом ходу, когда источником вибрации пильного диска являются аэродинамические возмущения и силы неуравновешенности, коэффициент излучения подчиняется рассмотренным выше закономерностям, которые характерны для бесконечной пластины и пластины со свободными от закрепления краями. Излучение на частотах ниже критической частоты ( $f_{кр}$ ) будет ослабленным из-за акустического короткого замыкания на наружном радиусе диска пилы.

В процессе пиления характер излучения шума диском пилы меняется из-за точечного возбуждения силами резания. Звуковая мощность в диапазоне частот  $f < f_{кр}$  излучается как зоной возбуждения, так и внешней кромкой пилы. Излучаемая кромкой звуковая мощность пропорциональна среднеквадратичной скорости диска пилы, т.е. она уменьшается по мере повышения его демпфирования. Излучаемая зоной возбуждения звуковая мощность пропорциональна квадрату силы возбуждения и почти не зависит от демпфирования. При увеличении демпфирования всегда остается излучение зоной возбуждения.

На частотах  $f > f_{кр}$  коэффициент излучения пилы постоянен. Сплошные отверстия в диске пилы (например, для установки подрезных ножей) создают условия для акустического короткого замыкания между передней и задней поверхностями диска пилы, что приводит к снижению излучения звуковой мощности.

Создание на поверхности диска пилы различного рода неоднородностей при неизменной колебательной скорости приводит к усилению звукоизлучения ниже критической частоты.

## Список литературы

1. Бородицкий А.С., Спиридонов В.М. Снижение структурного шума в судовых помещениях. – Л.: Судостроение, 1974. – 221 с.
2. Клюкин И.И. Борьба с шумом и звуковой вибрацией на судах. – Л.: Судостроение, 1971. – 415 с.
3. Старжинский В.Н., Гагарин Д.Р. К вопросу снижения шума круглых пил // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды VI международного Евразийского симпозиума. – Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2011. – С.335-338.
4. Старжинский В.Н., Гагарин Д.Р. Влияние демпфирования на снижение шума круглых пил деревообрабатывающих станков // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2009». – Одесса, 2009. – С.76-79.
5. Старжинский В.Н., Завьялов А.Ю., Совина С.В. Теоретические положения излучения шума пильным диском при резании древесины // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/109-9339> (дата обращения: 11.06.2013).

**Рецензенты:**

Санников А.А., д.т.н., профессор кафедры технической механики и оборудования целлюлозно-бумажных производств ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург;

Уласовец В.Г., д.т.н., профессор кафедры механической обработки древесины ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», г. Екатеринбург.