

## Нормирование и мониторинг вибрации ножевых размалывающих машин

С.Н. Вихарев

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский Тракт, 37, Екатеринбург, Россия  
cbp200558@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-7945-8027>

Статья поступила 13.04.2021, принята 20.05.2021

*Предметом исследования являются параметры вибрации ножевых размалывающих машин. Допустимые параметры вибрации оборудования целлюлозно-бумажного производства, в том числе мельниц, регламентируются ГОСТ 26493-85. Однако этот стандарт устарел и не учитывает новые конструкции ножевых размалывающих машин и требования государственных и международных стандартов. Для оценки вибрационного состояния ножевых размалывающих машин предлагается установить два критерия. Первый критерий оценки вибрационного состояния нормирует амплитуду вибрации в октавных полосах частот. Вторым критерий оценки нормирует тренд вибрации. В качестве измеряемого параметра вибрации следует использовать виброскорость. Результаты исследования вибрации мельниц выявили необходимость их разделения на две группы: с диаметром диска или конуса до 1000 мм включительно и с диаметром свыше 1000 мм. В статье определены границы зон и трендов вибрации ножевых размалывающих машин. По измеренным параметрам виброскорости мельниц можно определить зону их вибрационного состояния: хорошо; удовлетворительно; необходимо улучшение и недопустимо. Внедрение нормирования вибрации ускорит переход к ремонтам машин по техническому состоянию. Предложенная методика нормирования вибрации может использоваться в других отраслях промышленности.*

**Ключевые слова:** ножевые размалывающие машины, вибрация, нормирование, мониторинг.

## Rationing and vibration monitoring of knife refiners

S.N. Vikharev

Ural State Forest Engineering University; 37, Sibirsky Trakt St., Ekaterinburg, Russia  
cbp200558@mail.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-7945-8027>

Received 13.04.2021, accepted 20.05.2021

*The subject of the study is the parameters of the vibration of knife grinding machines. Permissible parameters of vibration equipment of pulp and paper production, including mills, GOST 26493-85 are regulated. However, this standard is outdated and does not take into account the new designs of knife grinding machines and requirements of state and international standards. To estimate the vibration state of knife grinding machines, it is proposed to set two criteria. The first evaluation criterion of the vibration state normalizes the amplitude of vibration in octave frequency bands. The second evaluation criterion normalizes vibration trend. Vibration accumulation should be used as the measured vibration parameter. The results of a study of the milling vibration reveal the need to separate them into two groups: with a diameter of a disk or cone up to 1000 mm inclusive and with a diameter of over 1000 mm. The article identifies the boundaries of zones and trends of vibration of knife grinding machines. According to the measured parameters of the vibration, the mills can be determined by the zone of their vibration state: good; satisfactorily; improvement is needed and unacceptable. The implementation of vibration rationing speeds up the transition to the repair machines for technical condition. The proposed vibration rationing technique can be used in other industries.*

**Keywords:** refiners, vibration, rationing, monitoring.

**Введение.** Ножевые размалывающие машины - основное технологическое оборудование в линиях подготовки волокнистых материалов целлюлозно-бумажной промышленности. Эти машины обладают повышенной динамичностью и различаются по назначению, конструкции и мощности привода [1,2]. Динамика ножевых размалывающих машин исследована в работах [3-5].

Различают гигиеническое и техническое нормирование вибрации. Гигиеническое нормирование вибрации

осуществляется по ГОСТ 12.1.012—2004 [6]. Этот стандарт нормирует параметры вибрации по критериям здоровья человека с учетом напряженности и тяжести труда. Техническим нормированием вибрации оборудования целлюлозно-бумажных производств занималась в восьмидесятые годы прошлого столетия группа исследователей Уральского лесотехнического института под руководством А.А. Санникова. В результате исследований появился ГОСТ 26493-85 [7], который устанавливает допустимые значения амплитуды вибрации для обо-

рудования целлюлозно-бумажных производств, в том числе и мельниц. Вибрационные характеристики служат критериями качества, надежности и безопасности оборудования. Однако ГОСТ 26493-85 устарел, не учитывает новые конструкции ножевых размалывающих машин и требования государственных и международных стандартов. Цель работы – нормирование и мониторинг вибрации этих машин, задача – разработка критериев оценки вибрационного состояния ножевых размалывающих машин.

**Методы исследований.** Вибрационное состояние ножевых размалывающих машин определяется по двум критериям. Первый критерий нормирует амплитуду вибрации в октавных полосах частот, второй – тренд вибрации по общему уровню.

Первый критерий определяет границы амплитуды виброскорости, которые рассчитываются по допустимым динамическим нагрузкам на подшипниковые узлы и допустимым параметрам вибрации, передаваемым на поддерживающие конструкции мельницы (фундаменты и междуэтажные перекрытия).

После обработки экспериментальных значений параметров вибрации каждого типоразмера мельницы определяют границы зон вибрации в октавных полосах частот. Затем максимальные расчетные параметры вибрации сравниваются с границами зон, полученными экспериментально.

Для принятия решения по оценке вибрационного состояния мельницы выделяют зоны состояния. Предлагается выделить четыре зоны вибрационного состояния. Зона А – зона вибрации новых и отремонтированных мельниц, которые вводятся в эксплуатацию. Зона В – это зона вибрации ножевых машин, которые пригодны для эксплуатации без ограничения сроков. Зона С – это зона вибрации мельниц, которые непригодны для длительной непрерывной эксплуатации. Такие мельницы могут эксплуатироваться лишь ограниченный период времени. После этого рекомендуется выявить причину повышенной вибрации и провести ремонтные работы для устранения этой причины. Зона D – это зона вибрации мельниц, которая может вызвать ее отказ. Рекомендуется такие мельницы выводить на ремонт [8].

Параметры вибрации ножевых размалывающих машин измерялись на целлюлозно-бумажных и деревоперерабатывающих предприятиях в течение длительной подконтрольной эксплуатации. Длительность подконтрольной эксплуатации составляла от года до двух десятков лет.

Допустимые параметры вибрации для установления границ зон определяются по формуле

$$[X]_c = \bar{X} + k \cdot \sigma_x, \quad (1)$$

где  $[X]_c$ ,  $\bar{X}$  – статистически допустимое и среднеарифметическое значение амплитуды вибрации для конкретной зоны;  $\sigma_x$  – среднее квадратическое отклонение амплитуды вибрации для конкретной зоны;  $k$  – квантиль распределения.

Квантиль принимается по t-распределению Стьюдента, учитывающем количество измерений и доверительную вероятность,  $k \approx 2$  [8].

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N}, \quad (2)$$

$$\sigma_x = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $X_i$  – амплитуда вибрации  $i$ -ой мельницы;  $N$  – количество однотипных мельниц.

**Результаты и дискуссия.** При нормировании вибрации ножевых размалывающих машин целесообразно использовать виброскорость, т.к. в спектре вибрации этих машин содержится большое количество высших гармонических составляющих. Для измерения амплитуды рекомендуется использовать ее среднее квадратическое значение. Это позволяет не учитывать фазовый угол между составляющими вибрации от различных источников. Поэтому принято решение о нормировании амплитуды виброскорости в виде среднее квадратических значений в октавных полосах частот. Как правило, на предприятиях отрасли для измерения вибрации применяют переносные приборы, характеристики которых выбирают по ГОСТ ИСО 2954 [9]. Измерение вибрации мельницы производят в трех взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к оси ротора: вертикальном, горизонтально-поперечном и горизонтально-осевом.

Изменение неуравновешенности ротора, дефекты подшипников и муфты, несоосность валов двигателя и мельницы диагностируются при помощи переносной или постоянно установленной виброизмерительной аппаратуры [3]. В настоящее время используют системы автоматического управления мельницей с интегрированной системой контроля вибрации. При проектировании ножевых размалывающих машин необходимо проводить вибрационный расчет [3], который заключается в определении параметров вынужденной вибрации и недопущении резонансных и околорезонансных режимов мельниц и их элементов.

Параметры вибрации различных типоразмеров мельниц при номинальном режиме эксплуатации для границы зон В/С представлены в табл. 1.

Проведен статистический анализ параметров вибрации мельниц различных типоразмеров с использованием пакета программ Statistica 13. Проанализированы полученные результаты, можно сделать вывод, что параметры вибрации мельниц различных типоразмеров не подчиняются закону нормального распределения, т. е. статистически неоднородны. Для обеспечения однородности полученных результатов выявлена необходимость разделения мельниц на две группы: с диаметром диска или конуса до 1000 мм включительно и с диаметром свыше 1000 мм. Границы зон А/В, В/С, С/D параметров вибрации мельниц приведены в табл. 2.

В спектрах виброскорости мельниц обычно доминирует обратная частота. Поэтому для оценки вибрационного состояния можно использовать пиковые значения амплитуды вибрации мельниц. Для этого средние квадратические значения амплитуды виброскорости в табл. 2 умножаются на постоянный коэффициент 1,41.

Таблица 1. Параметры вибрации мельниц для границы зон В/С

Диаметр диска (конуса) мельницы, мм	Среднее квадратическое значение виброскорости, мм/с, в октавных полосах с предельными частотами, Гц					
	2,8-5,6	5,6-11,2	11,2-22,5	22,5-45	45-90	90-180
300	-	1,0	1,5	1,5	1,4	-
500	-	1,0	1,6	1,7	1,5	-
630	-	1,1	1,6	1,6	1,6	-
800	-	1,1	1,8	1,7	1,6	-
1000	-	1,2	1,8	1,8	1,8	-
1250	-	1,4	2,4	2,5	1,8	-
1500	-	1,7	2,7	2,6	1,7	-
1650	-	1,8	2,8	2,8	1,8	-

Если используется фундамент мельницы с виброизоляторами, то значения параметров вибрации в табл. 2 следует умножить на коэффициент 1,56 [10].

Определение вибрационного состояния мельницы происходит путем сравнения экспериментальных параметров и тренда вибрации с допустимыми значениями в табл. 2. Оценка вибрационного состояния ножевых размалывающих машин проводится по критериям: зона А - хорошо; зона В - удовлетворительно; зона С - необходимо улучшение; зона D - недопустимо. Если полученный тренд виброскорости больше допустимых значений, представленных в табл. 2, то следует принимать меры даже в том случае, когда граница средних квадратических значений амплитуды виброс-

корости в зоне С по первому критерию еще не достигнута. Такое повышение тренда вибрации говорит о повреждении мельницы в начальной стадии развития дефекта. При повышении средних квадратических значений амплитуды виброскорости в октавных полосах частот рекомендуется провести спектральный анализ вибрации в узких полосах частот, а также спектральный анализ огибающей вибрации для идентификации дефекта ножевой размалывающей машины. После такого исследования принимается решение об ограничении ее функционирования. Как правило, ограничение функционирования проводится при помощи предупреждения и останова.

Таблица 2. Параметры вибрации мельниц

Диаметр диска (конуса) мельницы, мм	Границы зон	Среднее квадратическое значение амплитуды виброскорости, мм/с, в октавных полосах частот, Гц						Тренд виброскорости, (мм/с)/ч
		2,8-5,6	5,6-11,2	11,2-22,5	22,5-45	45-90	90-180	
До 1000 мм включительно	A/B	-	0,5	0,8	0,8	0,8	-	-
	B/C	-	1,2	1,8	1,8	1,8	-	1,5
	C/D	-	1,6	2,6	2,6	2,6	-	2,0
Свыше 1000 мм	A/B	-	0,8	1,4	1,4	0,8	-	-
	B/C	-	1,8	2,8	1,8	1,8	-	2,0
	C/D	-	2,7	4,0	4,0	4,0	-	3,0

Предупреждение – проводится тогда, когда среднее квадратическое значение амплитуды виброскорости или тренд вибрации достигли значений, когда требуется ремонт машины. При этом мельницу можно эксплуатировать в течение исследования и поиска причин изменения параметров вибрации. После этого планируют ремонт ножевой размалывающей машины.

Останов – проводится по достижении предельных значений параметров вибрации в зоне D или тренда вибрации согласно значений в табл. 2. При этом рекомендуется остановить машину, выявить и устранить причины повышенной вибрации.

Как показала практика определения вибрационного состояния мельниц, уровень «предупреждение» может изменяться в зависимости от условий эксплуатации этой машины. Поэтому этот уровень определяют относительно экспериментально установленному базовому значению. Обычно уровень «предупреждение» устанавливают на 30% выше значения максимальной границы зоны В.

Уровень «останов» также зависит от конкретных

условий эксплуатации и используется для предотвращения аварийных отказов мельницы. Как показала практика, для ножевых размалывающих машин уровень «останов» находится выше границы зоны С в 1,2-1,5 раза.

**Заключение.** В статье сделана попытка нормирования и мониторинга вибрации ножевых размалывающих машин.

Предлагается установить два критерия оценки вибрационного состояния мельниц. Первый критерий нормирует амплитуду вибрации в октавных полосах частот, по второй - тренд вибрации по общему уровню. В качестве измеряемого параметра целесообразно использовать среднее квадратическое значение виброскорости.

Выявлена необходимость разделения мельниц на две группы: с диаметром диска или конуса до 1000 мм включительно и с диаметром свыше 1000 мм.

Численно определены границы зон и тренда вибрации ножевых размалывающих машин. Вибрационное состояние оценивается по четырем критериям: хорошо;

удовлетворительно; необходимо улучшение и недопустимо. После чего принимается решение о возможном ограничении эксплуатации этих машин (предупреждение и останов).

Внедрение норм и мониторинга вибрации ускорит переход к ремонтам машин по техническому состоя-

нию. Методика нормирования и мониторинга может использоваться в других отраслях промышленности, например в горной и металлургической.

#### *Литература*

1. 1. Легоцкий С.С., Лаптев Л.Н. Размол бумажной массы. М.: Лесная пром-сть, 1981. 94 с.
2. 2. Пашинский В.Ф. Машины для размол волокнистой массы. М.: Лесная пром-сть, 1972. 160 с.
3. 3. Вихарев С.Н. Динамика мельниц для размол волокнистых полуфабрикатов. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 184 с.
4. 4. Вихарев С.Н., Сиваков В.П., Душинина С.А., Федотов А.Н. Виброзащита рафинеров производств химико-механической массы // Целлюлоза, бумага, картон. 2006. № 1. С. 66-67.
5. 5. Вихарев С.Н., Сиваков В.П. Динамика роторов дисковых мельниц // Вестн. Казанского гос. технического ун-та. 2012. Т. 15. № 7. С. 148-150.
6. 6. ГОСТ 12.1.012-2004. Вибрационная безопасность. Общие требования. Введ. 01.07.2008. М.: Стандартиформ, 2010. 16 с.
7. 7. ГОСТ 26563-85. Вибрация. Технологическое оборудование целлюлозно-бумажного производства, методы и средства защиты. Введ. 01.06.1986. М.: Изд-во стандартов, 1985. 13 с.
8. 8. Муромов В.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. М: Химия, 1990. 268 с.
9. 9. ГОСТ ИСО 2954-97. Вибрация машин с возвратно-поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерений. Введ. 01.07.1999. М.: Стандартиформ, 1999. 7 с.
10. 10. Вибрации в технике. Защита от вибрации и ударов: справ. В 6-ти т. / под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. 456 с.
11. 11. ГОСТ ИСО 7919-3-2002. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на вращающихся валах. Промышленные комплексы. Введ. 01.04.2008. М.: Стандартиформ, 2008. 18 с.

#### *References*

1. 1. Legockij S.S., Laptev L.N. Grind of paper stock. M.: Lesnaya prom-st', 1981. 94 p.
2. 2. Pashinskij V.F. Machines for grind of fibrous weight. M.: Lesnaya prom-st', 1972. 160 p.
3. 3. Viharev S.N. Dynamics of mills for grind of fibrous semi-finished products. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 184 p.
4. 4. Viharev S.N., Sivakov V.P., Dushinina S.A., Fedotov A.N. Vibro-protection of refiners of productions of chemical and mechanical weight // Cellyuloza, bumaga, karton. 2006. № 1. P. 66-67.
5. 5. Viharev S.N., Sivakov V.P. Dynamics of rotors of disk mills // Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. 2012. V. 15. № 7. P. 148-150.
6. 6. 36. GOST 12.1.012-2004. Vibration. General safety requirements. Vved. 01.07.2008. M.: Standartinform, 2010. 16 p.
7. 7. GOST 26563-85. Vibration. Technological equipment of pulp-and-paper production, methods and means of protection. Vved. 01.06.1986. M.: Izd-vo standartov, 1985. 13 p.
8. 8. Muromov V.L. Accident-free and diagnostics of violations in chemical productions. M: Himiya, 1990. 268 p.
9. 9. GOST ISO 2954-97. Vibration of Cars with reciprocating and rotary motion. Requirements to measuring instruments. Vved. 01.07.1999. M.: Standartinform, 1999. 7 p.
10. 10. Vibrations in the equipment. Protection against vibration and blows: sprav. V 6-ti t. / pod red. K.V. Frolova. M.: Mashinostroenie, 1981. V. 6. 456 p.
11. 11. GOST ISO 7919-3-2002. Vibration. Control of a condition of cars by results of measurements of vibration on the rotating shaft. Industrial complexes. Vved. 01.04.2008. M.: Standartinform, 2008. 18 p.