

**ПРОГРЕССИВНОЕ  
ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ  
И ИНСТРУМЕНТ**

**PROGRESSIVE WOODWORKING EQUIPMENT AND TOOL**

УДК 676.024.61

**С.Н. Вихарев**

(S.N. Viharev)

(УГЛТУ, г. Екатеринбург, РФ)

E-mail для связи с автором: cbp200558@mail.ru

**ВИБРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ  
ПРИ РАЗМОЛЕ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ  
В НОЖЕВЫХ МЕЛЬНИЦАХ**

**VIBRATING PROCESSES AT MILL FIBROUS SEMIFINISHED ITEMS  
IN REFINER**

*Статья посвящена новым подходам к исследованию вибрационных процессов при размоле волокнистых полуфабрикатов в ножевых размалывающих машинах. Ножевые размалывающие машины – основное технологическое оборудование для размола волокнистых материалов в целлюлозно-бумажной промышленности. Именно в них закладываются основные свойства бумаги и картона. В статье исследуется скорость скольжения ножей ротора по ножам статора. Впервые показана необходимость учета эффекта Доплера при исследовании вибрационных процессов в зоне размола. Погрешность при расчете гарнитурных частот без учета вышеназванного эффекта может достигать более 40 %, с учетом – до 8 %.*

*Article is devoted to new approaches to research of vibrating processes at mill fibrous semifinished items in refiner. Refiner – the basic process equipment for mill fibrous materials in a pulp and paper industry. In these machines the basic properties of a paper and a cardboard are pawned. In article speed of sliding of knives of a rotor on knives stamopa is investigated. For the first time necessity of the account of effect Doppler is shown at research of vibrating processes in a zone mill. The error at calculation plate frequencies without taking into account above named effect can reach more than 40 %, with the account – up to 8 %.*

Размол волокнистых полуфабрикатов производится, как правило, в ножевых размалывающих машинах. Динамика этих машин исследована в наших предыдущих работах [1–3]. Рассмотрим особенности вибрационных процессов в межножевом зазоре размалывающих машин.

Взаимодействие ротора и статора этих машин рассматривается как «движущаяся нагрузка» между подвижными и неподвижными ножами. При размоле ножи ротора скользят по ножам статора. Между ними находится размалываемый волокнистый материал.

Существует большое количество работ, посвящённых проблеме «движущихся нагрузок», где рассмотрены различные модели, описывающие взаимодействие движущегося объекта и упругой системы. Особенно стоит отметить работы школы



Из  $\triangle ODB$ ,  $\triangle ABC$  и  $\triangle ACD$  имеем

$$R\omega dt = dS \sin\varphi + dr \sin\psi, \quad (4)$$

где  $R$  – сторона треугольника  $OCB$ .

Подставляя (3) в (4), получим

$$R\omega dt = dS \sin(\psi + \varphi)/\cos\psi, \quad (5)$$

откуда имеем

$$V_N = dS/dt = \omega R \cos\psi/\sin\beta, \quad (6)$$

$$V_t = dr/dt = \omega R \cos\varphi/\sin\beta, \quad (7)$$

где  $V_N$  и  $V_t$  – векторы скоростей;

$\beta$  – угол перекрещивания ножей ротора и статора.

Из  $\triangle AEO$   $\sin\alpha/R = \sin\psi/R_0$ , откуда

$$\begin{aligned} \sin\psi &= R_0 \sin\alpha/R, \\ \cos\psi &= (1/R)(R^2 - R_0^2 \sin^2\alpha)^{1/2}, \end{aligned}$$

где  $\alpha$  – угол между ножом ротора и наружным радиусом гарнитуры  $R_0$ .

Подставляя полученное выражение в уравнение (6), получим

$$V_N = [\omega (R^2 - R_0^2 \sin^2\alpha)^{1/2}] / \sin\beta, \quad (8)$$

$$\cos\varphi = \cos(\beta - \arcsin R_0 \sin\alpha/R). \quad (9)$$

Подставляя полученные данные в уравнение (7), получим

$$V_t = [\omega R \cos(\beta - \arcsin R_0 \sin\alpha/R)] / \sin\beta. \quad (10)$$

Суммарная скорость скольжения ножа ротора по ножу статора

$$V = [(V_N)^2 + (V_t)^2]^{1/2}. \quad (11)$$

Формулы (8) и (10) справедливы при угле  $\beta$ , отличном от 0. Векторы скоростей  $V_t$  и  $V_N$  в зависимости от рисунка гарнитуры могут быть направлены от центра к периферии (режим прокачивания массы) и наоборот – от периферии к центру (режим удержания массы). Как показали расчёты, скорости скольжения ножей могут достигать 5 000 м/с и более, что сопоставимо со скоростью звуковых волн в металле.

При исследованиях подобных систем можно выделить два подхода, используемых при моделировании. В основе первого подхода лежит пренебрежение внутренними

степенями свободы движущегося объекта, а упругая система рассматривается как подвергшаяся воздействию заданной определённым образом внешней силы. Второй подход предлагает, что движущийся объект имеет свои степени свободы и смоделирован как масса или упругая дискретная система со многими степенями свободы. В этом случае контактная задача неизвестна и должна быть определена путём исследования взаимодействия двух тел [6].

При исследовании вибрационных процессов при размоле необходимо учитывать эффект Доплера, т. е. частоты, регистрируемые неподвижным вибропреобразователем на статоре, следует рассчитывать по формуле:

$$f^*ri = fri / (1 \pm V/C), \quad (12)$$

где  $fri$  – гарнитурная частота на  $i$ -м ножевом поясе;

$C$  – скорость звука в материале гарнитуры.

Частоты перекрещивания ножей гарнитуры будем называть «гарнитурными частотами». Это было впервые предложено нами в работе [7]. В уравнении (12) рассматривается «+», если скорость скольжения ножей направлена к вибропреобразователю, а «-» – в противоположном направлении. Частоты колебаний, регистрируемые вибропреобразователем, во многом зависят от места его закрепления, т. е. одни гарнитурные частоты определяются со знаком «+», другие – со знаком «-». Длина принимаемой волны определяется как

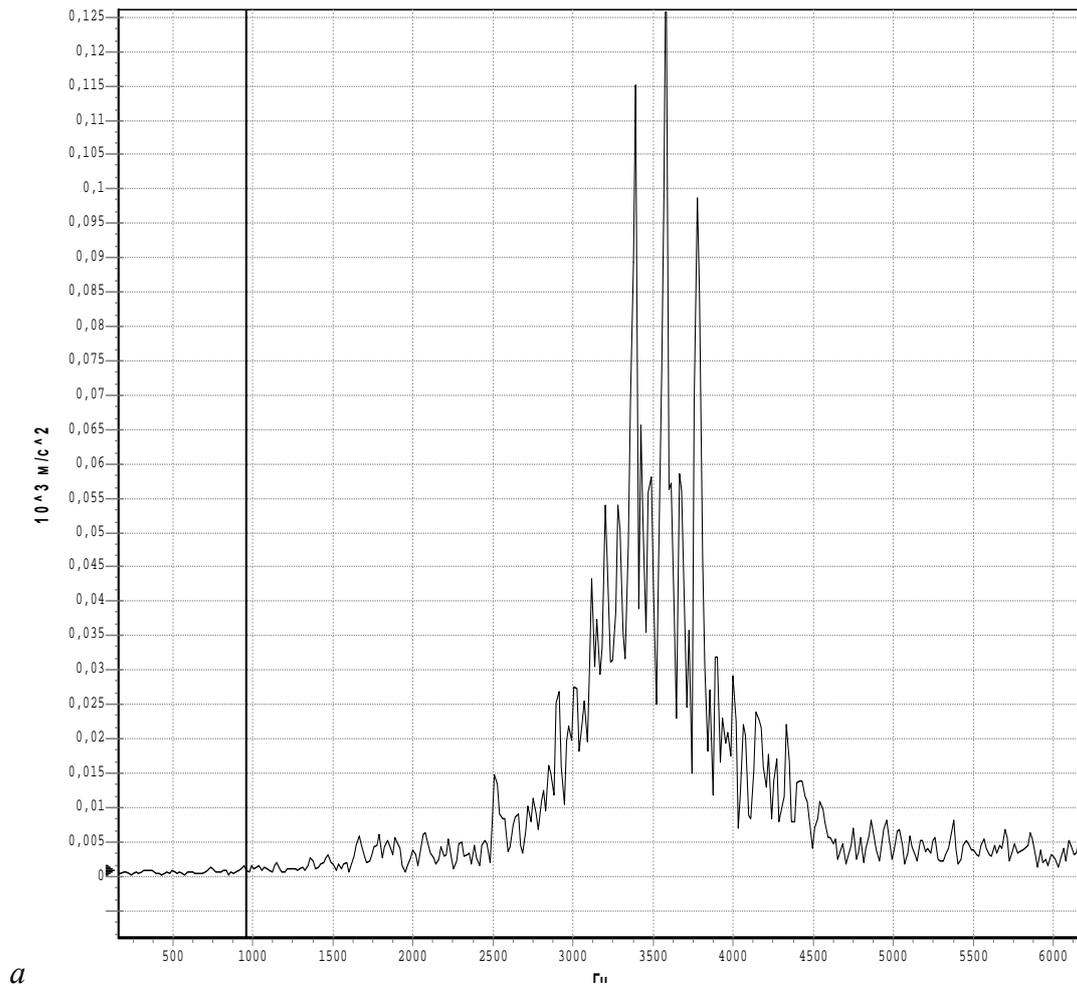
$$\lambda = (C - V) / f^*ri.$$

При малых скоростях движения ножей ротора по ножам статора на ножевых поясах отношение  $V/C \ll 1$ , и уравнение (12) можно записать как

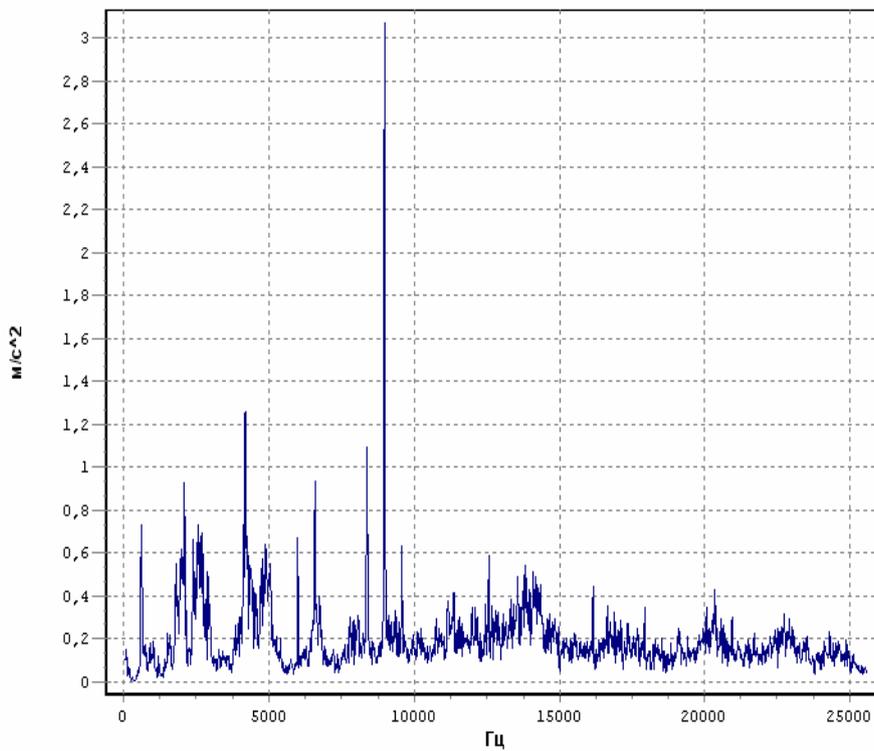
$$f^*ri \approx fri.$$

Эффектом Доплера в этом случае можно пренебречь. Однако при больших скоростях, когда  $V \approx C$ , расхождение между  $fri$  и  $f^*ri$  возрастает. При этом вышеназванный эффект необходимо учитывать.

Произведен расчет гарнитурных частот на периферийных ножевых поясах по методике, предложенной в работе [7] и формуле (12) с учетом эффекта Доплера. Проведены экспериментальные исследования вибрации мельниц на предприятиях отрасли. На рисунке 2 показан спектр вибрации статора мельницы RT-70 ЗАО «Туринский ЦБЗ» (гарнитура Д-1000.02, частота вращения ротора – 1000 об/мин). Скорость скольжения ножей составила  $V = 216$  м/с. Частота вибрации на статоре составляет 4,26 кГц. Гарнитурная частота на периферийном ножевом поясе, полученная расчетом по методике [7], составила 4,53 кГц (ошибка составила 6 %). С учетом эффекта Доплера расчетная гарнитурная частота составила 4,34 кГц (ошибка составила 2 %). Результаты исследований представлены в таблице.



а



б

Рис. 2. Спектры вибрации статора мельниц:  
а – RT-70 (ЗАОр «Туринский ЦБЗ»); б – TF-52 (ОАО «Соликамскбумпром»)

Скорость скольжения ножей и гарнитурные частоты на периферийных ножевых поясах гарнитуры

Марка мельницы / марка гарнитуры	Скорость скольжения ножей, м/с	Угол перекрещивания ножей, град	Частота вращения ротора, об/мин	Гарнитурная частота		
				По методике С.Н. Вихарева [7], кГц / относительная ошибка, %	По формуле (12), кГц / Относительная ошибка, %	Эксперимент, кГц
RT70 / Д.1000.002	216	26	1500	$\frac{4,53}{6}$	$\frac{4,34}{2}$	4,26
МД-5Ш1А / ХТМ1-00-11	253	20	1500	$\frac{7,07}{7}$	$\frac{7,68}{1}$	7,58
МД-5Ш1А / ХТМ1-00-17	8028	1,2	1500	$\frac{7,51}{41}$	$\frac{12,40}{3}$	12,75
МД-5Ш1А / ХТМ1-00-18	9210	0,8	1500	$\frac{9,12}{23}$	$\frac{10,83}{8}$	11,80
МД-31 / 1000.071	186	22	1000	$\frac{7,20}{5}$	$\frac{7,326}{4}$	7,59
МД-31 / Д56.01	442	12	1000	$\frac{6,67}{7}$	$\frac{6,13}{1}$	6,12
МД-31 / 1000.071	186	22	1000	$\frac{7,47}{9}$	$\frac{7,557}{4}$	7,85
МД-3Ш7 / 1000.71	448	14	1500	$\frac{9,60}{9}$	$\frac{9,88}{6}$	10,52
МД-14 / Р-630.002	164	12	750	$\frac{3,30}{7}$	$\frac{2,975}{3}$	3,07

Гарнитура мельниц имеет разнообразные рисунки, зависящие от размалываемого полуфабриката, конструкции мельниц, режимных и технологических факторов размолла. Зависимости гарнитурных частот от радиуса диска и скорости скольжения ножей от частоты вращения ротора, углов наклона и перекрещивания ножей представлены соответственно на рисунках 3 и 4.

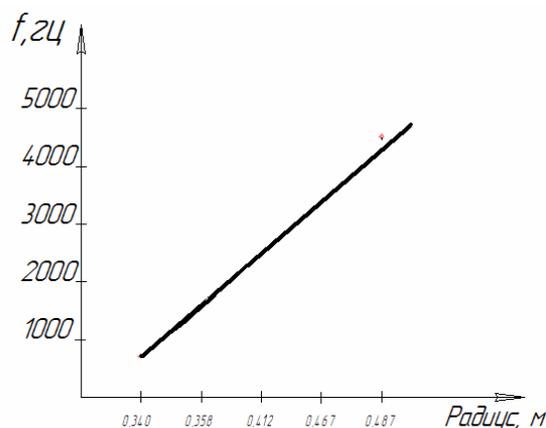


Рис. 3. Зависимость гарнитурных частот от радиуса диска

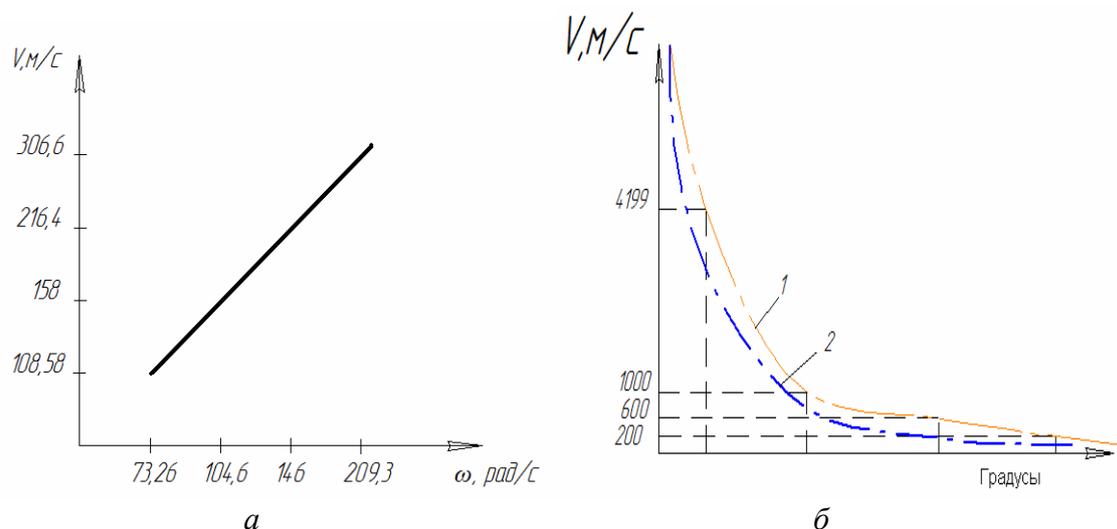


Рис. 4. Зависимости скорости скольжения ножей гарнитуры:

а – от скорости вращения ротора;

б – от угла наклона их к радиусу  $\alpha$  (1) и от угла перекрещивания  $\beta$  (2)

Скорость скольжения ножей зависит от рисунка гарнитуры и частоты вращения ротора. Вектор скорости может быть направлен к центру диска (режим удержания волокнистой массы) или к периферии диска (режим прокачивания). Скорость скольжения ножей может достигать скорости звука в металле. Поэтому при исследовании вибрационных процессов ножевых размалывающих машин необходимо учитывать эффект Доплера. Погрешности при расчете гарнитурных частот без учета вышеназванного эффекта может достигать более 40 %, с учетом – до 8 %. Для расчета гарнитурных частот рекомендуется вышеприведенная методика.

### Библиографический список

1. Вихарев С.Н. Динамика мельниц для размола волокнистых полуфабрикатов. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 184 с.
2. Вихарев С.Н., Санников А.А. Критические частоты вращения роторов дисковых мельниц // Машины и аппараты ЦБП: Межвуз. сб. науч. тр. Л., 1988. С. 36–40.
3. Вихарев С.Н., Сиваков В.П. Динамика роторов дисковых мельниц // Вестник Казанского гос. технич. университета, 2012. № 6. 4 с.
4. Весницкий А.И. Волны в системах с движущимися границами и нагрузками. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
5. Весницкий А.И., Потапов А.И. Теория колебаний распределенных параметрических систем. Горький: Издат-во Горьковского госуд. университета, 1980. 212 с.
6. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
7. Вихарев С.Н. Экспериментальные исследования процесса размола при помощи вибрации на гарнитуре статора // Машины и аппараты ЦБП: Межвуз. сб. науч. тр. Л., 1990. С. 29–33.