

УДК 621.179

И. В. Дубень¹, Д. А. Ционенко²¹Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Барановичи²Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ АБРАЗИВНЫХ ЧАШ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО МЕТОДА СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Предложен и обоснован обобщённый критерий оценки целостности и прочности абразивных чаш при использовании интегрального метода свободных колебаний. В основу положен статистический анализ амплитудно-частотной характеристики звука с определением выбросов на основе метода межквартильного расстояния. По результатам опытов подтверждена информативность и устойчивость обобщённого критерия относительно условий возбуждения колебаний и проведения измерений. Предложенная методика оценки целостности и прочности на основе интегрального метода свободных колебаний пригодна для неразрушающего контроля широкого класса изделий.

Введение. В работах [1], [2], [3], [4] была предложена методика определения целостности и прочности объектов контроля, изготовленных из композиционных материалов и имеющих сложную геометрическую форму, на основе использования интегрального метода свободных колебаний (далее — ИМСК). При этом было установлено, что в случае контроля изделий сложной геометрической формы, в частности, абразивных чаш МОК 150.18.004, при использовании ИМСК возникает необходимость в интегральном показателе, учитывающем множественность резонансных частот в условиях вариации геометрических размеров между экземплярами объекта контроля и вариации их физико-механических свойств.

Цель настоящей работы состоит в определении обобщённого параметра для оценки целостности и прочности абразивных чаш в рамках интегрального акустического метода свободных колебаний, который является инвариантным относительно начальных условий, определяющих возбуждение колебаний.

Объект и средства исследований. Нами проведена серия опытов, в которых объектом исследования были характеристики собственных колебаний чаши абразив-

ной МОК 150.18.004, являющейся основным рабочим органом машины для мойки и очистки картофеля (ОАО «Торгмаш», г. Барановичи). Чаша изготавливается из карбида кремния 53С160Н на бакелитовой связке (рисунки 1).

Для исследования физических свойств абразивных чаш была осуществлена случайная выборка девяти чаш из различных партий бакелита и карбида кремния, при этом хранение материалов и изготовление чаш производилось в различных условиях. Регистрацию и первичный анализ звука, излучаемого абразивной чашей, производили с помощью ноутбука с микрофоном и программы Audacity v1.3, предназначенной для записи фонограмм и обработки звука.

В опытах регистрировали звук, соответствующий собственным колебаниям абразивных чаш. Возбуждение колебаний осуществлялось посредством нанесения лёгкого удара небольшим молоточком в различные места поверхности чаш. Для реализации процедуры усреднения данных и определения погрешности измерения количество ударов, производимых по одной и той же чаше, равнялось шести. Спектральный анализ звуковых треков выполняли с помощью встроенной в программу Audacity функции FFT-анализа

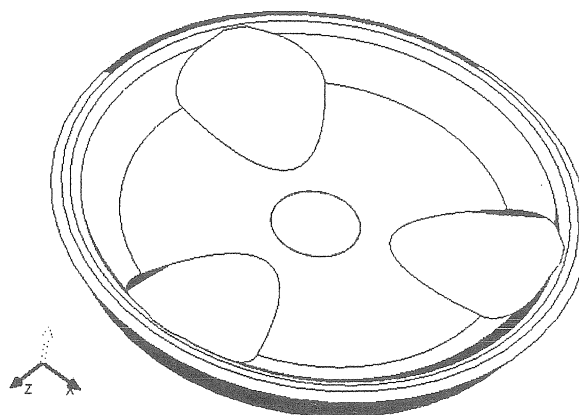


Рисунок 1 — Модель абразивной чашки в программе T-FLEX

(быстрое преобразование Фурье) при различных методах оконного сглаживания (прямоугольное окно, окно Бартлетта, окно Хемминга). Разрешения по частоте составляли 256...2048 отсчётов на диапазон частот 20...22 000 Гц, что соответствует шагу частоты между отсчётами Δf , равному 86,1...5,4 Гц.

В результате были получены амплитудно-частотные характеристики (далее — АЧХ) звукового сигнала (действительные составляющие ряда Фурье, соответствующие отсчётам по частоте). Обработка и анализ экспортированных численных данных проводились с помощью пакета MS Excel 2010.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Сравнительный анализ амплитудно-частотных характеристик чаш показал следующее:

1. Диапазон, в котором лежат все резонансные частоты у всех чаш, находится в пределах 1...6 кГц. Резонансные частоты собственных колебаний наблюдаются в пяти основных частотных интервалах (1,5...2,2 кГц; 2,5...3,0 кГц; 3,1...3,6 кГц; 4,1...4,5 кГц; 4,8...5,3 кГц). При этом пиковые значения сигнала у разных чаш соответствуют разным из указанных диапазонов частотам и характеризуются значительным разбросом, который обусловлен как изменением силы удара молоточка, так и свойствами конкретного образца.

2. Увеличение шага между отсчётами по частоте Δf с 5,4 до 86,1 Гц приводит к увеличению пиковых значений АЧХ в среднем на 6 дБ. Оптимальным можно считать шаг Δf , равный 40 Гц при 512 отсчётах на всю ширину звукового спектра 0...22 кГц.

3. Сравнение сглаживающих оконных функций (прямоугольное окно без сглаживания, окна Бартлетта и Хемминга) показало, что минимальная разница (до 1 дБ) по пиковым значениям на АЧХ наблюдается при шаге частоты Δf , равном 40...50 Гц. При больших и меньших значениях шага частоты изменение сглаживающей оконной функции обуславливает изменение экстремумов АЧХ до 2 дБ.

4. Для характеристики целостности и прочности чаш целесообразно использовать обобщённый критерий, рассчитываемый по максимальным значениям интенсивности звука в диапазоне частот 1...6 кГц: максимальные значения амплитуд на всей совокупности резонансных частот в указанном частотном диапазоне свидетельствуют о целостности абразивной чашки и прочности бакелитовой связки между зёрнами карбида кремния (рисунок 2).

Обобщённый критерий качества абразивных чаш определяли на основе статистических показателей. В общем случае звуковые сигналы имеют случайный характер. Дискретный

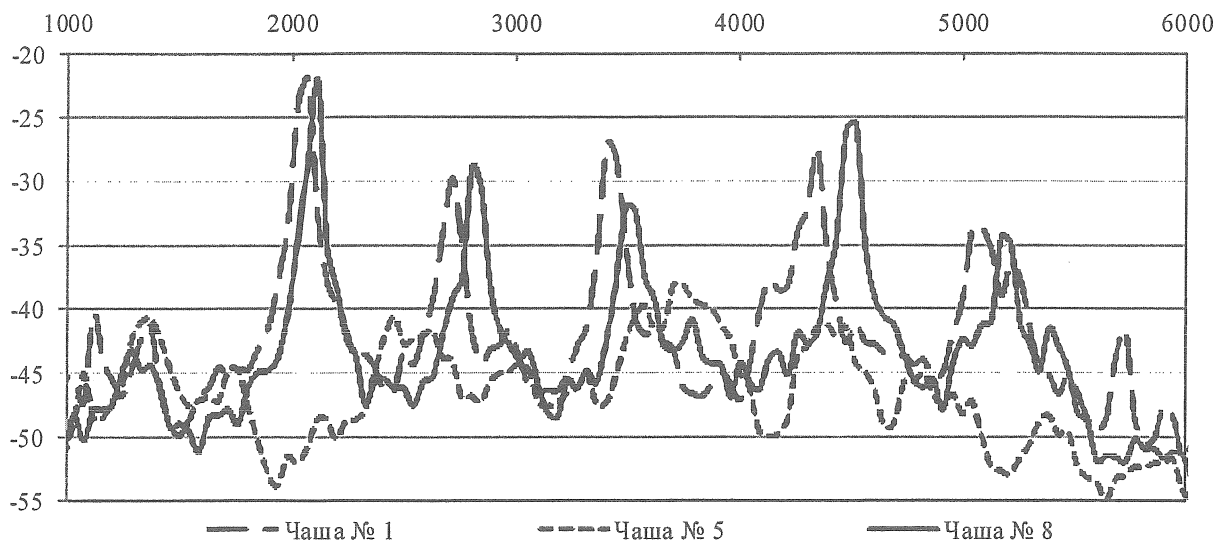


Рисунок 2 — Амплитудно-частотные характеристики абразивных чаш № 1 и № 8 (хорошего качества) и чаши № 5 (плохого качества) (по результатам априорной оценки) при шаге частоты Δf , равной 21,5 Гц в интервале частоты звука 1 000...6 000 Гц

звуковой сигнал на ограниченной длине аудиотрека представляет собой случайный процесс $s(t)$, преобразующийся в результате спектрального анализа (преобразования Фурье) в амплитудно-частотную характеристику $S(f)$, к которой применимы статистические методы.

Резонансными частотами будем называть участки АЧХ, на которых интенсивность звучания объектов контроля значительно выше, чем на других частотах. Так, для чаш № 1 и № 8 (см. рисунок 2) имеется пять интервалов резонансных частот, на которых сигнал превышает $-35 \dots -40$ дБ, для чаши № 5 имеется только один слабо-выраженный резонансный участок. Экстремумы сигнала на резонансных частотах (см. рисунок 2) можно рассматривать как выбросы — отклонения от закона нормального распределения. Приблизительная оценка допустимого числа выбросов составляет 20% от общей численности наблюдений и зависит от характера распределения, интенсивности вариации выборочных данных, а также от порогового уровня, с помощью которого выявляются выбросы [5]. Нашему случаю удовлетворяет метод выявления выбросов на основе межквартильного расстояния и построения диаграммы «ящик

с усами» (box-and-whisker plot), предложенной Дж. Тьюки (J. Tukey) в 1977 году. В рамках этого подхода выбросами считается всё, что выходит за пределы диапазона $[S_{25} - 1,5(S_{75} - S_{25}), S_{75} + 1,5(S_{75} - S_{25})]$, где S_{25} , S_{75} — первая (25%-я) и третья (75%-я) квартили распределения амплитуд на АЧХ [6], [7].

Для создания диаграммы «ящик с усами» изображают прямоугольник (ящик) с концами в первой S_{25} и третьей S_{75} квартилях распределения. Внутри ящика изображают статистическую медиану S_M в виде горизонтальной линии. От конца ящика изображают «усы» к наиболее дальним точкам, не являющимся выбросами, т. е. расположенным внутри интервала, равного $1,5(S_{75} - S_{25})$.

Обобщённым критерием качества абразивных чаш, характеризующим относительную величину амплитуд на резонансных частотах, может служить отношение среднего значения \bar{S}_B амплитуд спектральной характеристики, превышающих пороговый уровень, к значению этого порогового уровня S_P :

$$P = \frac{\bar{S}_B}{S_P}, \tag{1}$$

где S_p — пороговый уровень для определения выбросов на основе межквартильного расстояния.

Все величины, входящие в выражение (1), следует подставлять в натуральных единицах, для чего предварительно необходимо перевести их из децибел по формуле

$$S = 10^{\frac{S_{дБ}}{10}}.$$

Если значение P стремится к максимуму, то АЧХ звука имеет ярко выраженные экстремумы на резонансных частотах. При ударе по чаше слышен «звонкий» звук, что свидетельствует о твёрдой и прочной бакелитовой связке, отсутствии трещин и скрытых дефектов. Напротив, минимальное значение критерия $P (P \rightarrow 0)$ показывает отсутствие или «размазанность» экстремумов на АЧХ, что говорит о нарушении целостности чаши, неоднородности плотности материала. Это может быть связано с нарушением режима бакелизации при изготовлении либо с нарушениями технологии в процессе формовки.

Для проверки работоспособности критерия P по формуле (1) был выполнен расчёт по АЧХ абразивных чаш исследуемой выборки (таблица 1). Лучшими являются чаши № 6 и № 8, у которых значение критерия P больше восьми, что полностью совпадает

с априорной оценкой качества исследованной партии чаш. Очевидно, что чаша № 5, для которой значение P равно 1,2, значительно хуже всех остальных.

Все исследуемые абразивные чаши оказались достаточно чётко дифференцированы по значению обобщённого критерия P в пределах от 1,2 дБ (чаша № 5 низкого качества) до 7,0 дБ и более (чаши №№ 1; 3; 6 и 8). Характерно, что процентное содержание отсчётов, соответствующих выбросам, укладываемых в допустимое число выбросов 20%. Диаграмма типа «ящик с усами» (рисунок 3) поясняет порядок расчёта показателя P и входящих в формулу (1) величин.

Кроме информативности, важное требование к критерию P состоит в инвариантности по отношению к условиям проведения измерений и расчётов. Среди факторов, которые могут влиять на величину P , — разрешение АЧХ по частоте и сила удара по объекту контроля при проведении опытов. Приведение критерия P к определённому разрешению АЧХ производится по формуле

$$P' = P \frac{\log_2 n'}{\log_2 n},$$

где n и n' — количество отсчётов АЧХ на весь звуковой спектр 0...22 кГц.

Т а б л и ц а 1 — Результаты расчётов для девяти чаш при Δf , равной 43,1 Гц на интервале частоты 1...6 кГц

| Абразивная чаша | Номер чаши | | | | | | | | |
|--------------------------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Нижняя квартиль S_{25} , дБ | -46,1 | -46,7 | -47,0 | -47,6 | -49,6 | -45,6 | -44,4 | -47,4 | -47,3 |
| Медиана S_M , дБ | -43,5 | -44,0 | -45,0 | -45,5 | -46,9 | -43,6 | -42,4 | -44,4 | -44,1 |
| Верхняя квартиль S_{75} , дБ | -39,5 | -39,5 | -42,4 | -41,3 | -44,0 | -40,4 | -38,2 | -41,3 | -40,2 |
| Порог выбросов S_p , дБ | -36,2 | -35,1 | -38,3 | -37,0 | -39,7 | -36,3 | -34,0 | -36,9 | -35,7 |
| Среднее по выбросам \bar{S}_B , дБ | -29,2 | -30,2 | -30,5 | -30,4 | -38,5 | -28,0 | -28,5 | -28,9 | -30,6 |
| Критерий P , дБ | 7,0 | 5,0 | 7,8 | 6,6 | 1,2 | 8,3 | 5,5 | 8,1 | 5,1 |
| Доля выбросов, % | 15,5 | 12,9 | 15,5 | 14,7 | 2,6 | 12,9 | 13,8 | 12,1 | 12,1 |

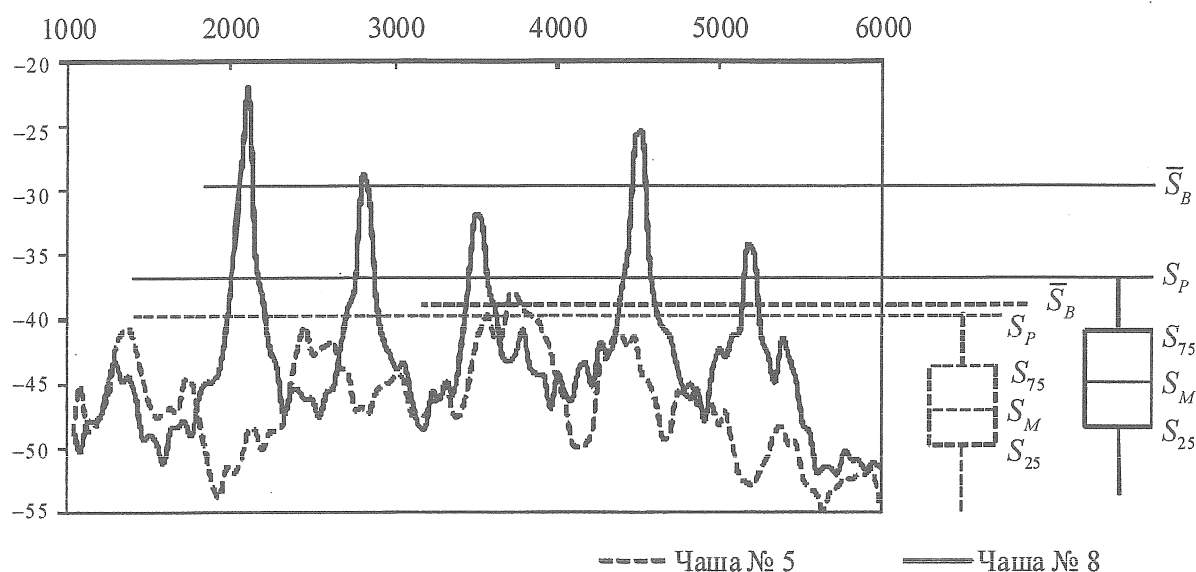


Рисунок 3 — Параметры диаграммы «ящик с усами» для расчёта критерия P

Отклонение значений критерия P' , приведённых к шагу частоты Δf , равному 21,5 Гц (таблица 2), не превышает по модулю 2,3 дБ и не носит систематического характера. Однофакторный дисперсионный анализ подтверждает, что разница между значениями критерия P при Δf , равном 21,5 Гц, и приведёнными к этой частоте значениями P' , статистически незначима по сравнению с вариацией между отдельными чашами (расчётное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}}$, равное 3,91, больше критического $F_{\text{кр}}$, равного 2,13, при уровне значимости α , равной 0,05).

Выполнение экспериментов в шести повторностях позволило оценить влияние на критерий P вариации, обусловленной силой отдельных ударов. При этом длина аудиотре-

ков с отдельными ударами (0,5...1,0 с) значительно больше минимальной длины трека 0,023 с при принятой частоте дискретизации звука 44,1 кГц. Как показал дисперсионный анализ, качество исследуемой чаши на значения критерия P влияет значительно сильнее, чем изменение силы удара ($F_{\text{расч}} = 18,37 > F_{\text{кр}} = 2,15$ при уровне значимости, равной 0,05). На рисунке 4 для всех девяти чаш показаны интервалы варьирования критерия P по шести повторностям проведения измерений.

Так как значения квартилей S_{25} , S_{75} и порогового уровня S_P зависят от силы удара по чаше и, как следствие, от общего уровня АЧХ, то в результате значение критерия P практически не зависит от силы удара по чаше. Например, для чаши № 1 вариация силы удара по шести

Т а б л и ц а 2 — Результаты приведения значений критерия P к шагу частоты АЧХ Δf , равному 21,5 Гц (число отсчётов 1 024 на интервал частоты звука 0...22 кГц)

| Число отсчётов, n | $\log_2 n$ | Δf , Гц | Номер чаши | | | | | | | | |
|---------------------|------------|-----------------|------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 256 | 8 | 86,1 | 6,9 | 5,8 | 8,3 | 6,1 | 1,3 | 10,5 | 6,9 | 8,3 | 6,4 |
| 512 | 9 | 43,2 | 7,7 | 6,1 | 9,2 | 7,7 | 1,4 | 9,8 | 6,4 | 9,2 | 6,4 |
| 1 024 | 10 | 21,5 | 8,0 | 6,1 | 8,9 | 8,3 | 1,2 | 9,3 | 6,7 | 9,0 | 6,0 |
| 2 048 | 11 | 10,8 | 7,8 | 5,7 | 8,7 | 8,2 | 1,3 | 8,6 | 7,0 | 8,6 | 6,7 |
| 4 096 | 12 | 5,4 | 7,5 | 5,8 | 8,1 | 7,9 | 1,1 | 8,4 | 6,5 | 8,1 | 6,0 |

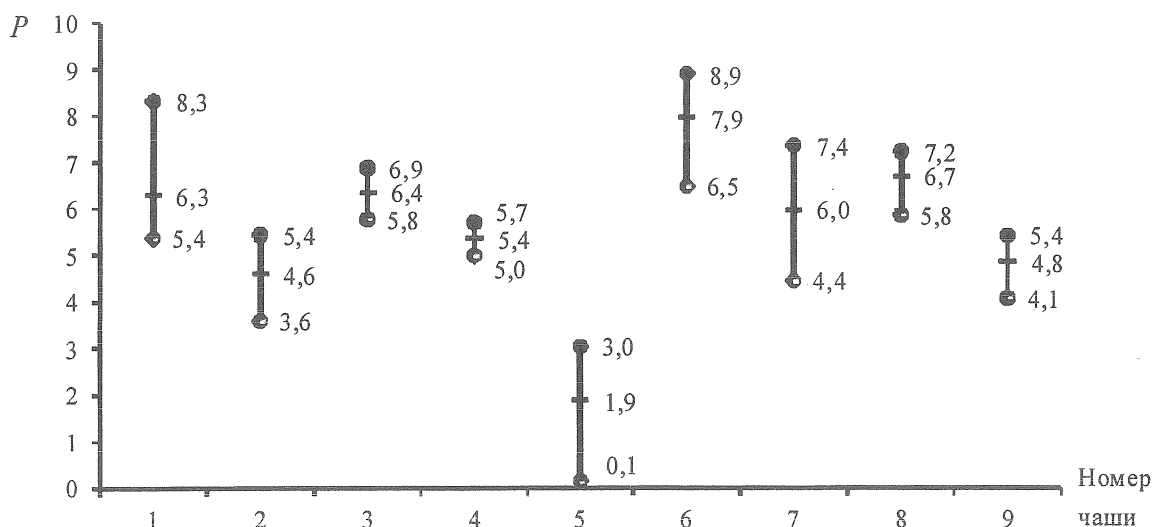


Рисунок 4 — Значения и интервалы варьирования критерия P для абразивных чаш №№ 1...9 по повторностям ударов при шаге частоты Δf , равной 86,1 Гц.

повторностям вызывает изменение порогового уровня S_p в интервале $-29,5...-34,4$ дБ, в результате значение обобщённого критерия P изменяется в меньшем интервале (5,4...8,3 дБ), т. е. всего лишь в 1,7 раза (см. рисунок 4).

Однако, с учётом возможного влияния посторонних факторов в условиях производства, вопрос о необходимом количестве повторностей измерения нуждается в отдельном изучении.

Выводы. Для оценки целостности и качества изделий сложной формы из композитных материалов, к которым относятся абразивные чаши машины МОК-150.18.004, оптимальным является интегральный метод свободных колебаний. При этом целесообразно использовать обобщённый критерий, рассчитываемый на основе статистического анализа АЧХ звука. Это позволяет в полной мере учитывать множественность резонансных частот собственных колебаний объекта контроля в рассматриваемом интервале звуковых частот. Значение критерия рассчитывается согласно методу выявления выбросов на основе межквартильного расстояния. В опытах подтверждено, что критерий обеспечивает необходимую избирательность и устойчивость относи-

тельно условий, определяющих возбуждение колебаний и процесс измерений.

Разработанная нами методика сравнительной оценки целостности и прочности на основе ИМСК и обобщённого критерия качества P , рассчитываемого по спектральной характеристике звука, пригодна для неразрушающего контроля достаточно широкого класса изделий из композитных материалов, керамики и металлов.

Список цитируемых источников

1. Ционенко, Д. А. Определение характеристик качества абразивных чаш для контроля в процессе их изготовления / Д. А. Ционенко, И. В. Дубень // Содружество наук. Барановичи-2011 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., 24—25 нояб. 2011 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: А. В. Никишова (гл. ред.) [и др.]. — Барановичи : РИО БарГУ, 2011.
2. Дубень, И. В. Экспериментальное обоснование интегрального акустического метода для контроля качества абразивных чаш / И. В. Дубень, Д. А. Ционенко // Научно-методические проблемы современной физики : сб. материалов междууз. науч.-метод. конф., посвящ. 300-летию со дня рождения М. В. Ломоносова, Брест, 17—18 нояб. 2011 г. / Брест. гос. ун-т им. А. С. Пушкина; под общ. ред. В. С. Секержицкого. — Брест : БрГУ, 2012. — С. 155—160.
3. Борис, Е. В. Анализ спектра звуковых колебаний / Е. В. Борис, Н. Д. Дедулько // Содружество наук. Барановичи-2011 : материалы VII Междунар. науч.-

практ. конф. молодых исследователей, 19—20 мая 2011 г., Барановичи, Респ. Беларусь : в 2 ч. / редкол. : А. В. Никишова (гл. ред.), И. Я. Тучина (отв. ред.) [и др.]. — Барановичи : РИО БарГУ, 2011. — Ч. 1. — С. 187—188.

4. *Панцевич, Т. В.* Колебания тел с цилиндрической симметрией / Т. В. Панцевич, Е. В. Борис // Содружество наук. Барановичи-2011 : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, 19—20 мая 2011 г., Барановичи, Респ. Беларусь : в 2 ч. / редкол. : А. В. Никишова (гл. ред.), И. Я. Тучина (отв. ред.) [и др.]. — Барановичи : РИО БарГУ, 2011. — Ч. 1. — С. 201—202.

5. *Burke, S.* Missing values, Outliers, Robust statistics and Non Parametric methods / S. Burke // VAM Bull. — Vol. 19. — 1998. — Autumn, P. 22—27.

6. *Чуракова, И. Ю.* Направления использования методик выявления аномальных наблюдений при решении задач операционного менеджмента / И. Ю. Чуракова // Научные докл. — № 13. — СПб. : ВШМ СПбГУ, 2010.

7. *Хованова, Н. А.* Методы анализа временных рядов / Н. А. Хованова, И. А. Хованов. — Саратов : Колледж, 2001. — 120 с.

Материал поступил в редакцию 12.12.2012 г.

The generalized criterion of assessing the integrity and strength of the abrasive cups proposed and justified in the frame of integral method of free oscillations. It is based on the statistics analysis of the frequency response of the sound with the definition of fluctuations on the basis of interquartile range. Informativity and stability of the generalized criterion are fixed established according to the results of the experiments. The independence of this criterion on the initial conditions and methods of measurements is found out too. The method of assessing the integrity and strength based on the integral method of free oscillations is suitable for non-destructive testing a wide range of products.