

## ВИЗНАЧЕННЯ РЕЗОНАНСНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПУЛЬСАЦІЙНОГО АПАРАТА З ВІБРУЮЧИМ РОТОРОМ

Samoychuk K.O., Cand. Sci. (Tech.),  
Assoc. Prof.  
Ivzhenko A.O.

Tavria state agrotechnical university, Melitopol,  
Ukraine, e-mail: samanya\_kir@mail.ru

### DETERMINATION OF RESONANCE MODES OF OPERATIONS OF PULSATION MACHINE WITH VIBRATING ROTOR

***Мета.** Мета статті полягає у визначенні основних кінематичних і конструктивних параметрів роботи пульсаційного апарату з вібруючим ротором для гомогенізації молочної емульсії в енергоефективному (резонансному) режимі його роботи.*

***Методика.** У процесі досліджень використано теорії дискретно-імпульсного введення енергії, коливань консервативних лінійних систем та класичні залежності механіки та гідродинаміки.*

***Результати.** В умовах резонансних коливань, завдяки багатократному підвищенню відносних швидкостей фаз і підсиленню кавітації, інтенсифікуються процеси диспергування і гомогенізації. Виходячи з цього, пульсаційний апарат необхідно проектувати таким чином, щоб постійно підтримувався резонансний режим його роботи. Частотами, які підлягають синхронізації, є: коливання статора, модулятора і коливання ротора уздовж вісі обертання. За умови виникнення резонансу між цими частотами отримані залежності, що пов'язують конструктивні параметри ротора і модулятора пульсаційного апарату (довжину каналу статора, ширину і відстань між каналами ротора, радіус ротора) з частотами обертання і вібрації ротора під час обробки молока. Для дослідного апарату розраховані частоти обертання та вібрації ротора, які забезпечують резонансний режим роботи пульсаційного апарату в зоні номінальних частот обертання валів електродвигунів. Такими значеннями, наприклад, є частоти обертання ротора 3312, 2576, 1545 об/хв, за яких підвищується ступінь диспергування молочної емульсії та знижуються питомі енерговитрати процесу.*

***Наукова новизна.** Удосконалено математичну модель пульсаційного апарату з вібруючим ротором, яка описує його роботу в енергоефективному (резонансному) режимі роботи.*

***Практична значущість.** Отримані результати спрямовані на удосконалення методики розрахунку і проектування пульсаційного апарату з вібруючим ротором.*

***Ключові слова:** диспергування, роторно-пульсаційний апарат, вібрація, розрахунок, резонанс, коливання.*

**Постановка проблеми.** У харчовій, як і в багатьох інших галузях промисловості, широко розповсюджені процеси гомогенізації і диспергування. Апарати, які використовуються для їхнього проведення, мають низку суттєвих недоліків і часто не відповідають сучасним вимогам якості та енергозбереження. Наприклад, під час переробки молока клапанні гомогенізатори мають енерговитрати більше 8 кВт/т і швидкий знос плунжерних пар та робочих органів, ваку-

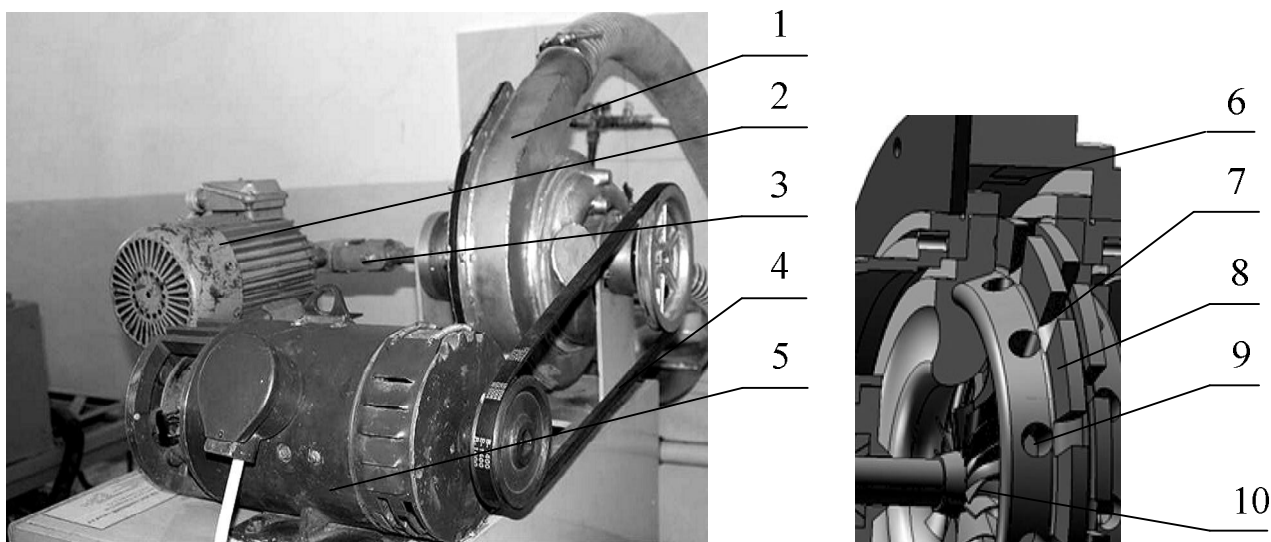
умні – не забезпечують необхідного ступеня диспергування тощо [1]. Тому завдання удосконалення існуючих конструкцій диспергаторів за рахунок концентрації енергії та ефективного її розподілення по об'єму продукту, що обробляється, є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішення завдання розробки енергоефективних конструкцій гомогенізаторів ускладнюється відсутністю загально визнаної теорії процесу диспергування. Спостереження за процесом роздрібнення мікроскопічної жирової кульки молока в щілині клапанного гомогенізатора вперше було здійснено в 2005 році в університеті Лунда (Швеція) під час використання сапфірового вікна в сидлі клапана і пульсуючих лазерів вздовж робочої щілини. Доведено твердження про визначальну роль у процесі деформації і руйнування жирової кульки молока в клапанному гомогенізаторі градієнта швидкості [2].

Відомо, що серед великої кількості конструкцій апаратів для гомогенізації та диспергування, максимальний градієнт швидкості створюється в роторних апаратах [3]. Серед них виділяються роторно-пульсаційні, призначені для багатofакторного імпульсного впливу на гетерогенну рідину для отримання стабільних високодисперсних емульсій і суспензій [4]. За останні роки удосконаленню та розширенню сфер використання таких апаратів присвячена значна кількість публікацій. В Україні найбільш раціонально та послідовно ідея використання коливального руху рідини в технологічних процесах реалізована в дослідженнях Інституту технічної теплофізики НАН України під керівництвом А.А. Долинського. Недоліком під час гомогенізації молока в роторно-імпульсних апаратах є наявність часток жиру великої фракції, які утворились або внаслідок коалесценції жирових кульок, або потрапили в зону недостатнього енергетичного впливу і не були зруйновані [3].

Надійним методом підвищення ефективності роторно-пульсаційних апаратів є накладення механічних коливань на оброблюване середовище для виникнення резонансних явищ. Проведемо співставлення двох способів введення енергії в рідину: в роторному-пульсаційному апараті і за умови накладення механічних коливань. Якщо розглянути дисипацію потужності в роторно-пульсаційному апараті, то внаслідок високої нерівномірності її розподілення по об'єму апарата (у пристінних зонах градієнт швидкості на порядок вищий, ніж у центральних) відбувається дисипація потужності не на поверхні розподілу фаз, а на всьому об'ємі. У результаті цього енергія використовується неефективно. Оскільки увесь об'єм гетерогенної рідини в пульсаційному апараті здійснює коливання, то логічно припустити, що дисипація буде відбуватися на всьому об'ємі з однаковою інтенсивністю. При цьому позбавимося застійних зон (з низьким градієнтом швидкості), і будуть усунуті недоліки в дисперсному складі оброблюваного продукту [5].

**Постановка завдання.** Процеси диспергування, що відбуваються в пульсаційних апаратах з вібруючим ротором, практично не досліджені. Тому розроблено конструкцію такого апарата, вібруючим елементом в якому є ротор 8, що здійснює синусоїдальні коливання вздовж вісі обертання під впливом кривошипного механізму 3 від окремого електродвигуна 2, як наведено на рисунку 1 [6].



1 – пульсаційний апарат; 2 – електродвигун приводу вібрації ротора; 3 – кривошипний механізм; 4 – клинопасова передача; 5 – електродвигун обертання ротора; 6 – напірний канал статора; 7 – паз ротора; 8 – ротор; 9 – радіальні отвори ротора; 10 – крильчатка.

*Рисунок 1 – Загальний вигляд експериментальної установки пульсаційного апарату з вібруючим ротором*

Роторно-пульсаційні апарати радіального типу з циліндричним ротором і радіальними пазами використовують найчастіше завдяки створенню насосного ефекту. Але такі апарати, за використання вібруючого ротора, будуть мати низьку ефективність, адже вектор стиснення рідини буде спрямований вздовж отворів і пульсації зменшуються.

Для підвищення насосного ефекту під час використання пазів 7, розташованих паралельно валу, використовуємо крильчатку 10. Радіальні отвори 9 створюють необхідну пульсацію рідини.

У роторно-пульсаційних апаратах класичного типу з довгими каналами виявлено явище резонансу – збіг частоти вимушених коливань ротора та пульсацій рідини в отворах і пазах ротора. Канал статора є задавальною коливальною системою з розподіленими параметрами. У каналі статора за певних співвідношень, внаслідок віддзеркалення коливань від відкритого кінця в каналі, утворюється нерухома хвиля і виникає резонанс. Під час роботи пульсаційного апарата в резонансному режимі значно збільшується його ефективність – амплітуда пульсацій рідини збільшується до 4 разів, а витрати енергії зменшуються на 40-60% [7]. Тому основним завданням проектування апарата з вібруючим ротором є розрахунок апарата для утворення нерухомої хвилі, частота якої співпадає з частотою вібрації ротора.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Пульсаційні явища в дослідному апараті здійснюються таким чином. За збігу каналів ротора і статора по каналу останнього поширюється імпульс стиску, тобто по каналу переміщається із швидкістю звуку передній фронт імпульсу підвищеного тиску. Під час від-

дзеркалення від відкритого кінця задній фронт імпульсу стискування повертається на початок каналу. При цьому можливі два випадки.

Перший – до моменту повернення – канали співпали, в цьому випадку перепад тиску між ротором і статором зростає.

Другий – до моменту повернення імпульсу розрядки канал закритий, і цей імпульс, змінивши знак, повертається до відкритого кінця каналу, відбивається без втрати знака і повертається до початку каналу. Якщо канали співпадають, то перепад тиску зменшується. Збільшення перепаду тиску позитивно впливає на розвиток процесу кавітації.

Механізм інтенсифікації диспергування за виникнення резонансу полягає, по-перше, в тому, що щільність енергії нерухокої хвилі в 4 рази більша за рухому.

По-друге, кавітуючі пухирці і частки дисперсної фази рухаються в полі нерухомих хвиль в зустрічних напрямках, що посилює дію кавітації.

По-третє, тверді частки прискорюються під час руху до пучності і сповільнюються за наближення до вузлів тиску, що збільшує відносну швидкість обтікання і кількість взаємних зіткнень.

Кавітація, хоча і не є визначальною в процесі диспергування жирової фази молока, але значно інтенсифікує останню фазу – руйнування деформованих (витягнутих) під впливом градієнта швидкості жирових часток. Тому її інтенсифікація позитивним чином впливає на якість гомогенізації.

У випадку, коли пази ротора співпадають (рисунок 2), основна частота статора дорівнює [7]:

$$f_c = \frac{k \cdot c}{2l_c}, \quad (1)$$

де  $l_c$  – довжина каналу статора, м;

$c$  – швидкість звуку в двофазному середовищі, м/с;

$k = 1, 2, 3$  тощо.

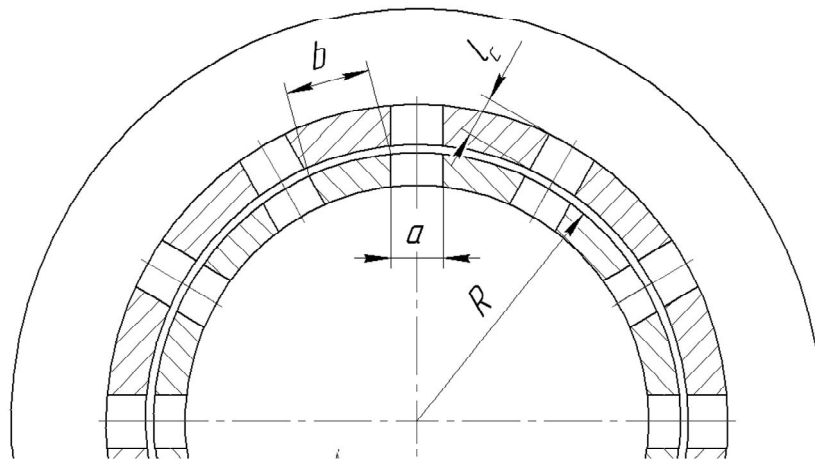


Рисунок 2 – Схема пульсаційного апарата

Якщо канал статора закритий проміжком між каналами ротора, власна частота його коливань визначається з виразу:

$$f_k = \frac{k \cdot c}{4l_c}, \quad (2)$$

де  $k = 1, 3, 5$  тощо.

Крім того, в каналі статора можливий нелінійний резонанс, визначуваний формулами (1) і (2) з подвоєнням знаменника. Для корпусу ротора, в першому наближенні, резонансні частоти визначаються виразом (2), а також можливістю виникнення нелінійного резонансу.

Умовою спільного резонансу в каналі статора і в камері озвучування (модуляторі) є рівність  $f_c = f_k$ , а частота коливань ротора повинна співпадати з ними  $f_p = f_c = f_k$ .

Основна частота коливань, що генерована модулятором роторного апарата, визначається так:

$$f_m = n \cdot z / 60, \quad (3)$$

де  $n$  – частота обертання ротора, об/хв;

$z$  – кількість отворів ротора.

Частота резонансних коливань визначається задавальною системою – каналом або камерою озвучування (статором), незалежно від механізму збудження (рівняння (3)). Очевидно, найкращий випадок – рівність виразу (3) з виразом (1) або (2). Конкретний результат має бути підтверджений експериментально.

Умова виникнення резонансного процесу визначається співвідношенням [7]:

$$\tau_1 / \tau_2 = 2; 6; 10; \dots; 4k + 2, \quad (4)$$

де  $\tau_1$  – час, коли канал статора закритий, с;

$\tau_2$  – час пробігу імпульсу тиску по довжині каналу, с;

$k = 0, 1, 2, 3$  і т.д.

Час, коли канал статора закритий, є таким

$$\tau_1 = (a + b) / \omega R, \quad (5)$$

де  $a$  – ширина каналу ротора, м;

$b$  – ширина зазору між каналами, м;

$\omega$  – кутова швидкість,  $\text{с}^{-1}$ ;

$R$  – радіус ротора, м.

Час пробігу імпульсу тиску по довжині каналу

$$\tau_2 = l_c / c, \quad (6)$$

За умови  $\tau_1 = \tau_2$ , отримаємо

$$\frac{(a+b)}{\omega R} = \frac{l_c}{c}(4k+2), \quad (7)$$

Звідки

$$\omega = \frac{(a+b)c}{R l_c(4k+2)}, \quad (8)$$

Для дослідного пульсаційного апарата з вібруючим ротором за умови гомогенізації в ньому молочної емульсії  $a = 0,02$  м;  $b = 0,032$  м;  $c = 140$  м/с;  $R = 0,1$  м. Тому

$$\omega = \frac{(0,02 + 0,032)140}{0,1 \cdot 0,015(4k+2)} = \frac{4853}{(4k+2)}.$$

Або

$$n = \frac{30\omega}{\pi} = \frac{46366}{(4k+2)}.$$

Під час конструювання роторно-пульсаційного апарата для зменшення його вартості доцільно використовувати частоту обертання ротора, наближену до частоти обертання валу електродвигуна. Тому варті уваги резонансні частоти в зонах номінальних частот обертання валів електродвигунів (таблиця 1).

Таблиця 1 – Резонансні частоти обертання ротора

$n$ , об/хв	3312	2576	2107	1783	1545	1363	1220	1103	1007	927
$4k+2$	14	18	22	26	30	34	38	42	46	50
$f_m$ , Гц	662	515	421	157	309	272	244	220	201	185

У резонансному режимі частота вібрації ротора має наближатись до розрахованих в таблиці 1 значень  $f_m$  або бути кратною до неї

$$f_p = f_m k, \quad (9)$$

де  $k=1, 2, 3$  і т.д.

Для виникнення явища резонансу в класичних пульсаційних апаратах радіальний зазор між статором і ротором (для випадку великих зазорів як в дослідному апараті) визначається з виразу [8].

$$\delta = \frac{(0,438\dots 0,435)kD}{z_p}, \quad (10)$$

де  $D$  – діаметр ротора, м;  
 $z_p$  – кількість каналів ротора;  
 $k = 1, 2, 3$  і т.д.

Для дослідного апарату ( $D = 0,2$  м;  $z_p = 12$ )

$$\delta = \frac{(0,438\dots 0,435) \cdot k \cdot 0,2}{12} = (0,00730\dots 0,00725)k.$$

Тобто за амплітуди коливань ротора 1 мм (що максимально припускає дослідна установка), за одне коливання ексцентрика частота збігу умов для виникнення коливань створиться 137 разів. Збільшення кількості таких резонансних явищ інтенсифікує процес диспергування, разом з тим підвищує і енерговитрати.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Явище резонансу в роторно-пульсаційних апаратах призводить до значного підвищення пульсацій та інтенсивності кавітації, що збільшує ефективність диспергування і гомогенізації.

Досліджено умови виникнення резонансу в пульсаційному апараті з вібруючим ротором.

Отримано залежності, що дозволяють розрахувати частоти обертання і коливання ротора дослідного апарата для його роботи в резонансному режимі.

У подальшому планується визначити енергоефективні режими роботи пульсаційного апарата з вібруючим ротором і провести експериментальні дослідження для встановлення впливу резонансних явищ на ефективність гомогенізації молока.

#### Список літератури / References:

1. Нужин Е.В. Гомогенизация и гомогенизаторы: монография / Е.В. Нужин, А.К. Гладушняк – Одесса: Печатный дом, 2007. – 264 с.  
Nuzhin, E.V. and Gladushnyak A.K. (2007), *Gomogenizatsiya i gomogenizatory* [Homogenization and homogenizers], Pечатnyi dom, Odessa, Ukraine.
2. Innings F. Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer / F. Innings and C. Trägårdh // *Chemical Engineering & Technology*. – Vol. 28, Issue 8, August, 2005. – P. 882-891.

- Innings, F. and Trägårdh, C. (2005), *Visualization of the Drop Deformation and Break-Up Process in a High Pressure Homogenizer*, “Chemical Engineering & Technology”, vol. 28, Issue 8, August, pp. 882-891.
3. Фиалкова Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: монография-справочник / Е.А. Фиалкова. – СПб.: ГИОРД, 2006. – 392 с.  
Fialkova, E.A. (2006), *Gomogenizatsiya. Novyi vzglyad* [Homogenization. New look], GIORД, St.-Petersburg, Russia.
  4. Промтов М.А. Машины і апарати з імпульсними енергетичними діями на оброблювані речовини / А.М. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 136 с.  
Promtov, M.A. (2004), *Mashyny i aparati z impulsnimi energetichnimi diyami na obroblyuvani rehovini* [Machine and machines with the impulsive power operating on the processed substances], Mashinostroenie-1, Moscow, Russia.
  5. Абиев Р. Резонансная аппаратура для процессов в жидкофазных системах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии» / Руфат Шовкет оглы Абиев. – СПб., 2000. – 32 с.  
Abiev, R. (2000), *Rezonansnaia apparatura dlia protsessov v zhydkofaznyh sistemakh* [Resonance equipment for processes in жидкофазных system], Saint Petersburg state technological institute, St.-Petersburg, Russia.
  6. Пат. № 41129 Україна, В01 F 7/12. Роторно-пульсацийний апарат / А.О. Івженко, О.В. Гвоздєв, О.В. Івженко; заявитель и патентообладатель Таврійський державний агротехнологічний університет. – № u200812874; заявл. 04.11.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9.  
Ivzhenko, A.O., Gvozdev, O.V. and Ivzhenko, O.V. (2009), *Rotorno-pulsatsiyniy aparat* [Rotor-pulsation machine] Patent № 41129, Bul. 9, Tavria state agrotechnical university, Melitopol, Ukraine.
  7. Червяков В.М. Теоретические основы методов расчета роторных аппаратов с учетом нестационарных гидродинамических течений: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы». – Тамбов, 2007. – 35 с.  
Chervyakov, V.M. (2007), “Theoretical bases of methods of calculation of rotor machines taking into account non-stationary hydrodynamic flows”, abstract of Dr. Sci. (Tech.) dissertation, Machines, aggregations and processes, Saint Petersburg state technological institute, Tambov, Russia.

**Цель.** Цель статьи заключается в определении основных кинематических и конструктивных параметров работы пульсационного аппарата с вибрирующим ротором для гомогенизации молочной эмульсии в энергоэффективном (резонансном) режиме его работы.

**Методика.** В процессе исследований использованы теории дискретно-импульсного ввода энергии, колебаний консервативных линейных систем и классические зависимости механики и гидродинамики.

**Результаты.** В условиях резонансных колебаний, благодаря многократному повышению относительных скоростей фаз и усилению кавитации, интенсифицируются процессы диспергирования и гомогенизации. Исходя из этого, пульсационный аппарат необходимо проектировать таким образом, чтобы постоянно поддерживался резонансный режим его работы. Частотами, которые подлежат синхронизации, являются: колебание статора, модулятора и колебания ротора вдоль оси вращения. Из условия возникновения резонанса



между этими частотами получены зависимости, которые связывают конструктивные параметры ротора и модулятора пульсационного аппарата (длину канала статора, ширину и расстояние между каналами ротора, радиус ротора) с частотами вращения и вибрации ротора при обработке молока. Для опытного аппарата рассчитаны частоты вращения и вибрации ротора, которые обеспечивают резонансный режим работы пульсационного аппарата в зоне номинальных частот вращения валов электродвигателей. Такими значениями, например, являются частоты вращения ротора 3312, 2576, 1545 об/мин, при которых повышается степень диспергирования молочной эмульсии и снижаются удельные энергозатраты процесса.

**Научная новизна.** Усовершенствована математическая модель пульсационного аппарата с вибрирующим ротором, которая описывает его работу в энергоэффективном (резонансном) режиме работы.

**Практическая значимость.** Полученные результаты направлены на усовершенствование методики расчета и проектирования пульсационного аппарата с вибрирующим ротором.

**Ключевые слова:** диспергирование, роторно-пульсационный аппарат, вибрация, расчет, резонанс, колебание.

**Objective.** The aim of the article lays in determination of main kinematic and design operation factors of pulsation machine with a vibrating rotor for homogenization of milk emulsion in its power efficient (resonance) operating conditions.

**Methods.** In the process of researches the theories of discretely-impulsive introduction of energy, vibrations of conservative linear systems and classic dependences of mechanics and hydrodynamics are used.

**Results.** In the conditions of resonance vibrations, the processes of dispersing and homogenization intensify due to the frequent increase of relative speeds of phases and strengthening of cavitation. Hence the pulsation machine must be planned in such a way in order to constantly maintain its resonance operating conditions. Frequencies which must be synchronized are: oscillation of stator, modulator and oscillation of rotor along the axis of rotation. From the condition of origin of resonance between these frequencies the dependences are got which bind the design operation factors of rotor and modulator of pulsation machine (length of channel of stator, width and distance between the channels of rotor, radius of rotor) to frequencies of rotation and vibration of rotor at processing of milk. For the laboratory machine the frequencies of rotation and vibrations of rotor are calculated, which provide the resonance mode of operation of pulsation machine in the zone of nominal frequencies of rotation of motor shafts. Such values are for instance frequencies of rotation of rotor 3312, 2576, 1545 rpm, at which the degree of dispersing of milk emulsion rises and specific power inputs of the process go down.

**Academic novelty.** The mathematical model of pulsation machine with a vibrating rotor is improved which describes its operation in its power efficient (resonance) operating conditions.

**Practical importance.** The results found are aimed at improving the design procedure and planning of pulsation machine with a vibrating rotor.

**Key words:** dispersing, rotor-pulsation machine, vibration, calculation, resonance, oscillation.

Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук,  
Панченком А.І.

Дата надходження рукопису 31.01.2013 р.