

**Кобец А.С.**доктор наук по государственному
управлению, профессор**Сокол С.П.**

к.т.н., доцент

Черний А.А.

старший преподаватель кафедры

**Днепровский
государственный
аграрно-экономический
университет****Дырда В.И.**

д.т.н., профессор

**Институт
геотехнической механики
им. Н.С. Полякова
НАН Украины****Kobets A.****Sokol S.****Cherniy A.****Dnipro State University of
Agriculture and Economics****Dyrda V.****M.S. Polyakov Institute of
Geotechnical Mechanics
under the NAS of Ukraine****УДК 622.539.375:678****ДИНАМИКА РЕЗОНАНСНЫХ
ВИБРАЦИОННЫХ МАШИН
ПРИ ПОНИЖЕННЫХ
ТЕМПЕРАТУРАХ**

Одним из показателей эффективности технологического процесса является использование транспортирующих машин с высокими технико-экономическими характеристиками, а также высокими показателями эксплуатационной надежности и долговечности. На практике хорошо себя зарекомендовали конструкции машин для транспортировки грузов, что используют в процессе вибрацию. В этой статье рассматриваются вибрационные трубные конвейеры типа КВ2Т. Благодаря своим преимуществам, эти машины успешно справляются с поставленными задачами, будучи в составе технологических линий транспортирования, сепарации, сушки, охлаждения полезных грузов на предприятиях металлургической, химической, строительной и других отраслей народного хозяйства. Так как это резонансная система, то вопрос о неизменности во времени параметров её вибрации является очень актуальным. Многолетний опыт использования вибрационных конвейеров показал, что в виде упругого звена у них используют резинометаллические элементы, которые характеризуются нелинейностью демпфирующих свойств. В этом случае, важным является учет всех реологических характеристик резины при описании динамики машины. Основным фактором, который изменяет параметры жесткости упругих элементов, в исследованиях определена температура окружающей среды, в которой работает машина. За рабочий диапазон принималась температура окружающей среды ниже нуля градусов. Используя выведенную формулу определения амплитуды, построено кривую зависимости амплитуды колебаний от пониженной температуры окружающей среды. Проведенные на практике измерения амплитуды колебаний системы при низких температурах окружающей среды, показывают хорошую сходимость с теоретической зависимостью.

Ключевые слова: двомассная система, вибрация, резинометаллические элементы, температура, амплитуда.

Постановка проблемы. В последние годы в различных отраслях народного хозяйства для осуществления транспортно-технологических операций получил распространение вибрационный транспорт, имеющий ряд преимуществ по сравнению с традиционными средствами – ленточными, пластинчатыми, скребковыми конвейерами и другими транспортными машинами. Конкурентоспособность вибрационных машин

обеспечивается главным образом их соответствием технико-экономическим требованиям. Наряду с выполнением технологических процессов, вибротранспортные машины отличаются простотой конструкции и удобством обслуживания, малой удельной металлоемкостью, высокой степенью надежности, не загрязняют окружающую среду и т.д. [1]. Но наряду с преимуществами, есть



некоторые нерешенные вопросы, связанные с повышением эффективности работы вибротранспортных машин. Наиболее важными из них являются задачи описания динамики машины, у которой в качестве упругих звеньев используются резинометаллические элементы. Так как резина, как амортизационный материал, отличается от других материалов рядом свойств, которые еще исследуются.

Анализ последних исследований и публикаций.

Вопросам динамики вибрационного оборудования посвящены научные публикации многих ученых, как Украины так и зарубежья. Что касается конструирования и внедрения в технологические линии металлургической, горной, химической и др. отраслей, тяжёлых вибрационных машин, то большой вклад в это внесли и продолжают работу в этом направлении ученые Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова и «Днепровской политехники» (г. Днепр): Булат А.Ф., Надутый В.П., Лисица Н.И., Потураев В.Н. и др. Это подтверждается многочисленными монографиями, научными статьями, патентами, и, что особенно важно, внедрениями машин в производство. Рассматривая резину как амортизационный материал, было сконструировано огромное число деталей нацеленных на погашение вредного влияния вибрации. Их описание и точный расчет, представленный в четырёхтомнике [1], даёт возможность более точно определить параметры систем. Также, многолетний опыт внедрения в процессы транспортирования и доставки минерального сырья, подтверждает высокую актуальность на сегодня использования вибромашин [5]. Ученые

«Львовской политехники»: Шенбор В.С., Боровец В.Н., Корендий В.Н., Шенбор Ю.В., Брусенцов В.Г., также развивают методы оптимального конструирования вибрационных транспортеров [3]. Большие наработки в развитии вибрационных машин, которые используются в перерабатывающей и пищевой отраслях, имеют исследователи Винницкого национального аграрного университета: Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Волинец Е.О., Походай Н.В. [6].

Проведя анализ последних исследований и публикаций по данной теме, было установлено, что методики расчета вибрационных транспортных машин продолжают совершенствоваться.

Формирования цели исследований.

Для определения более точной амплитудно-частотной характеристики виброконвейера с резинометаллическими элементами при воздействии на него различных факторов, необходимо усовершенствовать методику его расчета. Особенно важно определить поведение виброконвейера при работе его в зонах с пониженной температурой, так как это влияет на упругие свойства резины и приводит к аварийным ситуациям.

Основной материал исследований.

В полной мере высокими качествами транспортирования обладают виброконвейеры типа KB2T (рис.1) с резиновыми упругими связями [5]. Конвейер представляет собой двухмассную резонансную систему и состоит из двух транспортирующих труб (рис. 2), связанных между собой упругими звеньями в виде плоских металлических или пластиковых рессор, пружин или резиновых элементов.

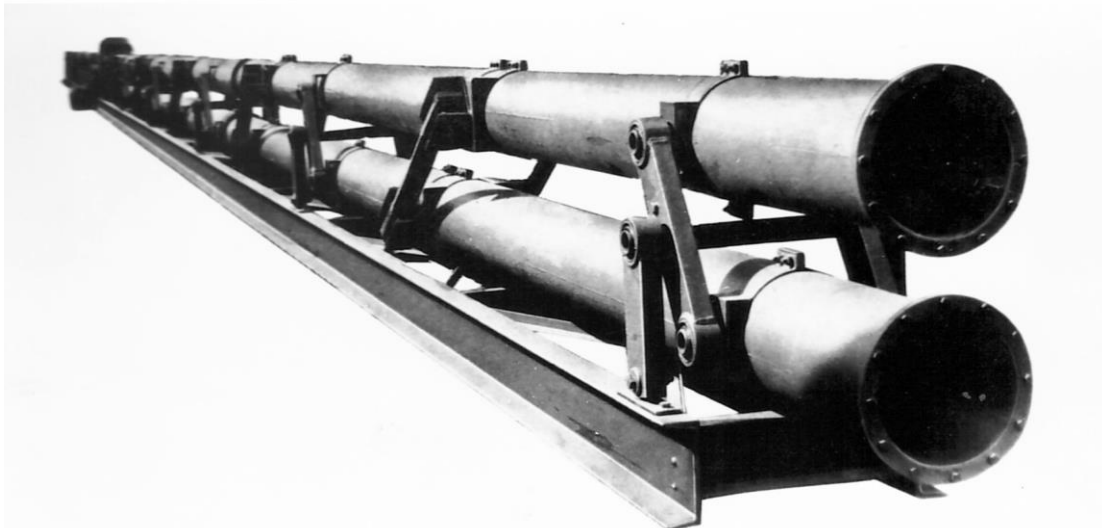


Рис. 1 Виброконвейер KB2T.

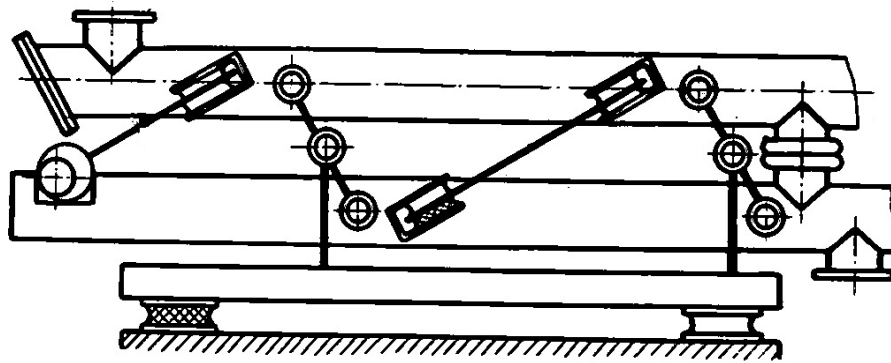


Рис. 2 Схема виброконвейера KB2Т.

Трубы посредством резинометаллических шарниров, установленных в опорных узлах, соединяются с рамой конвейера. К нижней трубе присоединен эксцентриковый привод с упругим шатуном. Для герметичного транспортирования различных материалов в местах загрузки и выгрузки установлены специальные резиновые герметизаторы. Техническая характеристика конвейеров типа KB2Т трех типоразмеров, выпускаемых промышленностью, приведена в табл. 1.

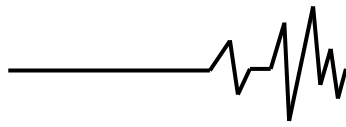
По своей структурной схеме и динамическим характеристикам конвейеры KB2Т по сравнению с другими вибрационными транспортными машинами являются наиболее совершенной системой. Они основаны на принципе колебаний в резонансном режиме навстречу друг другу двух равных по величине масс, поэтому в любой момент времени силы инерции масс уравновешены между собой как по величине, так и по направлению. Благодаря этому динамические нагрузки, действующие на рабочие органы конвейера и его привод, обычно незначительны, машина в целом уравновешена и не оказывает существенного воздействия на фундамент. При неравномерной загрузке рабочих органов материалом, а также при аварийных ситуациях: забивании рабочего органа материалом вследствие налипания, поломки упругих узлов и т. д., воздействие машины на фундамент резко возрастает. Для предотвращения этого нежелательного явления конвейеры устанавливаются на виброизоляторах.

Оптимальная длина транспортирования конвейеров KB2Т не превышает 30 м. Известны образцы длиной до 100 м. Однако в этих конвейерах мощность привода резко возрастает с увеличением длины транспортирования.

Конвейеры KB2Т отвечают большинству современных технико-экономических требований: они отличаются простотой конструкции, низкой металлоемкостью, сравнительно большой производительностью, долговечностью и надежностью, экономически выгодными и не загрязняют окружающую среду. Рассмотрим эти показатели более подробно.

1. Конвейеры KB2Т, как это видно с рис. 1, конструктивно просты и состоят из четырех основных узлов: рабочего органа, привода, основных и поддерживающих упругих связей. Основные узлы конвейеров обладают взаимозаменяемостью, ремонтпригодностью, простотой монтажа и обслуживания. Простота конструкции в сочетании с высокой надежностью и долговечностью позволяет осуществлять автоматизацию производственных процессов и не требует присутствия людей. Эти же качества и минимальное количество движущихся частей не создают условий для травматизма операторов.

2. Металлоемкость конвейера резко снижается при использовании в качестве упругих звеньев резинометаллических блоков типа БРМ. В табл. 1 приведены значения масс M конвейеров KB2Т, приходящихся на один метр длины транспортирования L (M/L), и условные коэффициенты масс $K_M = M/L \cdot Q$, представляющие собой отношение удельной металлоемкости 1 м длины транспортирования (M/L) к единице производительности (Q). Как видно, использование резинометаллических блоков позволило снизить удельную металлоемкость в 1,7-2,6 раза. Помимо этого следует учитывать различную долговечность блоков и металлических элементов. Ресурс работы на отказ блоков превышает 70 тыс. часов. Обычно за этот период приходится заменять 100% рессор и пружин несколько раз.



Таблиця 1

Техническая характеристика виброконвейеров KB2T

Типо-размер конвейера	Внутренний диаметр рабочего органа, м	Тип упругих связей	Производительность Q, м ³ /ч	Длина транспортирования L, м	Тип эксцентрикового вибровозбудителя	Мощность двигателя, кВт	Масса М, кг	M/L, кг/м	K _M , (кг·ч)/(м·м ³)
KB2T-0,15	0,15	рессоры	12	20	С жестким шатуном	4,5	3100	155	19,4
		пружины	16	20	С жестким шатуном	10,0	2910	146	9,1
		блоки БРМ	20	20	С упругим шатуном	7,0	2910	146	17,3
KB2T-0,30	0,30	рессоры	40	30	С жестким шатуном	14,0	9400	314	7,8
		пружины	63	30	С жестким шатуном	22,0	7750	258	4,1
		блоки БРМ	80	30	С упругим шатуном	17,0	7700	256	3,2
KB2T-0,45	0,45	пружины	100	20	С жестким шатуном	34,0	10010	503	5,0
		блоки БРМ	160	30	С упругим шатуном	17,0	13750	458	2,9

3. По сравнению с другими вибромашинами конвейеры KB2T имеют большую производительность. Это достигается двумя путями: во-первых, использованием структурной схемы машины с двумя грузонесущими органами и, во-вторых, использованием интенсивного режима вибрации: сравнительно низкой частоты (10-12 Гц) и больших амплитуд (до 10,5 мм). Такие амплитуды удалось реализовать благодаря использованию в качестве основных упругих звеньев блоков типа БРМ из резины 51-1562.

4. Конвейеры KB2T обладают малой энергоемкостью (табл. 1). Это достигается двумя путями: использованием резонансного режима колебаний и применением упругой подвески в виде резинометаллических звеньев (блоков и шарниров) и эксцентрикового привода с упругим шатуном.

5. Конвейеры KB2T экологически чисты, т. е. не загрязняют окружающую среду, что достигается использованием специальных герметических устройств (рис. 2). Высокая степень герметичности, надежность и значительная долговечность резиновых герметизаторов (наработка на отказ двухгофровых герметизаторов Г-200 из резины 51-1648 превышает 15000 часов) позволила решить проблему пылеплотной или, при необходимости, герметичной транспортировки пылящих, токсичных и абразивных материалов. Это особенно важно на современных предприятиях химической, металлургической и

других отраслей промышленности, где вопросам экологии уделяют большое внимание.

6. Не смотря на простоту конструкции вибрационные конвейеры требуют специфического подхода к изготовлению. Поэтому стоимость их при малосерийном производстве на сегодняшний день остается относительно высокой.

Применение вибрационных конвейеров типа KB2T, в свою очередь позволило создать новые прогрессивные технологии герметичного транспортирования мелкодисперсных, токсичных и абразивных материалов, а также позволило интенсифицировать ряд технологических процессов, таких как: сушка, охлаждение, смешивание и ряд других.

На сегодняшний день, виброконвейеры KB2T используются в различных отраслях народного хозяйства: металлургической, химической, строительной и других, выполняя транспортно-технологические операции при переработке сложных удобрений и минерального сырья [1, 4, 5].

Расчет динамики конвейеров при пониженных температурах.

В связи с тем, что рассматриваемая система уравновешена, её поведение можно описать уравнением вида [1].

$$\frac{1}{2} m\ddot{x} + cx = c_0 \rho \sin \omega t, \quad (1)$$

где m – масса рабочего органа; c – приведенная жесткость основных упругих



связей;
 c_0 – жесткость приводных упругих связей;
 ρ – эксцентриситет;
 ω – частота нагружения;
 x – перемещение рабочего органа.

Для учета упруго-наследственных свойств резины в уравнении (1) заменим жесткость оператором [2]

$$\tilde{N}_t = C_0 [1 - \chi \dot{\gamma}_\alpha^* (-\beta)],$$

где C_0 – мгновенное значение жесткости упругих связей; χ, β – реологические параметры резины; \mathcal{D}_α^* – оператор.

Тогда решение уравнения (1) имеет вид

$$x = a \sin(\omega t - \varphi) \quad (2)$$

$$a = \frac{C_0 \rho}{2 \sqrt{\left(\frac{1}{4} m^2 \omega^4 - m \omega^2 c (1 - A) + c^2 (1 - A)^2 + c^2 B^2 \right)}}$$

где T_0 – температура окружающей среды;

$$K_v = \frac{\eta}{c_v};$$

η – коэффициент внешней теплопроводности: $c_v = C_v m_1 n$;
 C_v – удельная теплопроводность резины;
 m_1 – масса упругих элементов;
 n – число упругих элементов.

Рассмотрим динамику двухтрубного уравновешенного конвейера (диаметр одной трубы 150 мм длина конвейера 20 м), имеющего следующие параметры: $m=720$ кг; $c=3,6$ МН/м; $c_0=0,72$ МН/м; $\rho=1,9 \cdot 10^{-2}$ м; $\omega=65$ 1/с; $n=64$; $K_v=0,12$ 1/с (получено экспериментально).

Используя формулу (2) и экспериментальные значения $s(T)$ $B(T)$ и $c(T)$ [1-A(T)], получим зависимость амплитуды колебаний конвейера a от медленноизменяющейся температуры (рис. 3). Как видно, до температуры -15°C изменение амплитуды стационарного процесса колебаний незначительно. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, полученными для реальной конструкции в диапазоне пониженных температур $0-39^\circ\text{C}$.

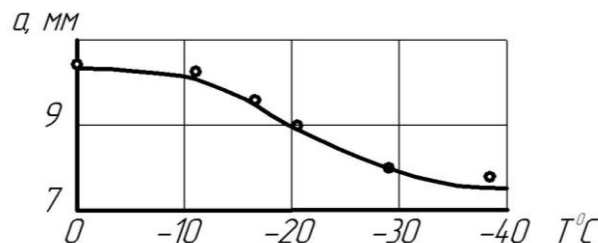


Рис. 3 Зависимость амплитуды колебаний рабочего органа конвейера от температуры окружающей среды $a(T)$:

точки – эксперимент, сплошная линия – расчет

Выводы. Таким образом, результаты исследований и их практическое доказательство, обеспечивают достаточно полное описание демпфирующих параметров резинометаллических изделий при низких температурах зависимостью (2), которая одновременно является эффективным средством расчета амплитудно-частотных характеристик нелинейных колебательных систем.

Список использованных источников

1. Булат А.Ф. Прикладная механика упруго-наследственных сред: в 4 т. / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, В.Г. Карнаухов, Е.Л. Звягильский, А.С. Кобец. – Киев: Наукова думка – 2011-2014. – Т. 1-4.

2. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. – Москва: Наука, 1977. – 384с.

3. Шенбор В.С. Деякі особливості оптимального конструювання вібраційних трубчастих транспортерів / В.С. Шенбор, В.М. Боровець, В.М. Корендій, Ю.В. Шенбор, В.Г. Брусенцов // Вібрації в техніці та технологіях. – 2017. – № 3 (86). – С. 110 –118.

4. Дорохов М.А. Экспериментальные исследования реологии резин / М.А. Дорохов, Г.Н. Агальцов, А.В. Новикова, Е.В. Калганков, И.Н. Цаниди, С.Н. Луценко // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 121. – С. 207–214.

5. Булат А.Ф. Разработка и широкое промышленное внедрение вибрационных машин и комплексов выпуска и доставки урановых руд при подземной добыче / А.Ф. Булат, В.И. Дырда, В.Н. Пухальский, Н.И. Лисица, А.А. Черний, Е.Ю. Заболотная // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 121. – С. 12-21.



6. Цуркан О.В. Особливості конструкції комбінованого змішувача для переробних і харчових виробництв / О.В. Цуркан, Ю.А. Полевода, Є.О. Волинець, М.В. Походай // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 1 (81). – С. 149-154.

Список источников в транслитерации

1. Bulat A.F., Dyrda V.I., Karnaukhov V.G., Zvyagil'skiy Ye L., Kobets A.S. (2011–2014). *Prikladnaya mekhanika uprugonasledstvennykh sred* [Applied mechanics of the elastic-hereditary media]. (Vols. 1-4). Kyiv: Naukova dumka [In Ukrainian].

2. Rabotnov Yu.N. (1977). *Elementy nasledstvenoy mekhaniki tverdykh tel*. [Elements of hereditary mechanics of solids]. Moscow: Nauka [In USSR].

3. Shenbor V.S., Borovets V.M., Korendii V.M., Shenbor Yu.V., Brusentsov V.G. (2017), *Deiaki osoblyvosti konstruiuvania vibratsiinykh trubchastych transporteriv* [Some features of the optimal design of vibratory tubular conveyors]. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh – Vibrations in technics and technologies* [In Ukrainian].

4. Dorokhov M.A., Agaltsov G.N., Novikova A.V., Kalgankov Ye.V., Tsanidy I.N., Lutsenko S.N. (2015). *Eksperimentalnye isledovanie reologii rezin* [Experimental Research Of Rubber Rheology] *Geotekhnicheskaya mekhanika. Megved. sb. nauch. tr. – Geotechnical mechanics. issue121. pp.207-214.*

5. Bulat A.F., Dyrda V.I., Pykhalskiy V.H., Lisitsa N.I., Chernii A.A., Zabolotnaya E.Yu. (2015). *Razrabotka i shirokoe promyshlenoe vnedrenie vibratsiynykh mashyn i kompleksov vypuska i dostavki uranovykh rud pri podzemnoy dobyche* [Development and broad industrial introduction of a set of vibrating machines and sets of owls issue and delivery of uranium ores in the underground production] *Geotekhnicheskaya mekhanika. Megved. sb. nauch. tr. – Geotechnical mechanics. issue121.pp.12-21*

6. Tsurkan O.V., Polyevoda Y.A., Volynets E.O., Pohoday M.V. (2016), *Osoblyvosti konstruksii kombinovanogo zmishuvacha dlia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv* [Features of construction of the combined mixer are for processing and food production]. *Vibratsii v tekhnike i tekhnologiyakh– Vibrations in technics and technologies* [In Ukrainian].

ДИНАМІКА РЕЗОНАНСНИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Одним з показників ефективності технологічного процесу, є використання транспортуючих машин з високими техніко-

економічними характеристиками, а також високими показниками експлуатаційної надійності та довговічності. На практиці, добре себе зарекомендували конструкції машин для транспортування вантажів, що використовують у процесі вібрацію. У цій статті розглядаються вібраційні трубні конвеєри типу KV2T. Завдяки своїм перевагам, ці машини успішно справляються з поставленими завданнями, будучи у складі технологічних ліній транспортування, сепарації, сушіння, охолодження корисних вантажів на підприємствах металургійної, хімічної, будівельної та інших галузей народного господарства. Так як це резонансна система, то питання про незмінність у часі параметрів її вібрації є дуже актуальним. Багаторічний досвід використання вібраційних конвеєрів показав, що у вигляді пружної ланки у них використовують гумометалеві елементи, які характеризуються нелінійністю демпфуючих властивостей. У цьому випадку, важливим являється врахування всіх реологічних характеристик гуми при описі динаміки машини. Основним фактором, що змінює параметри жорсткості пружних елементів у дослідженнях визначена температура навколишнього середовища в якій працює машина. За робочий діапазон приймалася температура навколишнього середовища нижче нуля градусів. Використовуючи виведену формулу визначення амплітуди, побудовано криву залежності амплітуди коливань від пониженої температури навколишнього середовища. Проведені на практиці вимірювання амплітуди коливань системи при низьких температурах навколишнього середовища показують добру подібність з теоретичною залежністю.

Ключові слова: двомасна система, вібрація, гумометалеві елементи, температура, амплітуда.

DYNAMICS OF RESONANT VIBRATION MACHINES AT LOW TEMPERATURES

One of the indicators of the efficiency of the technological process is the use of transporting machines with high technical and economic characteristics, as well as high indicators of operational reliability and durability. In practice, the design of machines for the transport of goods has proved to be very good, that vibration is used in the process. In this article, vibration tube conveyors of the KV2T type are considered. Thanks to their advantages, these machines successfully cope with the tasks set, being part of the technological lines of transportation, separation, drying, cooling of useful cargoes at the enterprises of the metallurgical, chemical,



construction and other branches of the national economy. Since this is a resonant system, the question of the invariance of the parameters of vibration in time is very important. Long-term experience of using vibrating conveyors has shown that in the form of an elastic link they use rubber-metal elements, which are characterized by a non-linearity of damping properties. In this case, it is important to take into account all the rheological characteristics of rubber when describing the dynamics of the machine. The main factor that changes the rigidity parameters of elastic elements, in studies is determined the

ambient temperature in which the machine operates. For the operating range, the ambient temperature was assumed to be below zero degrees. Using the deduced formula for determining the amplitude, a curve is constructed for the dependence of the amplitude of the oscillations on the lowered ambient temperature. Practical measurements of the oscillation amplitude of the system at low ambient temperatures show good convergence with the theoretical dependence.

Keywords: dumass system, vibration, rubber-metal elements, temperature, amplitude.

Сведения об авторах

Кобец Анатолий Степанович – доктор наук по государственному управлению, профессор, ректор, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. С. Ефремова, 25, 49600, Днепр, Украина.

Дырда Виталий Илларионович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, ул. Симферопольская, 2а, Днепр, 49600, Украина, e-mail: vita.igtm@gmail.com.

Сокол Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул.С. Ефремова, 25, 49600, Днепр, Украина.

Черний Александр Анатольевич – старший преподаватель кафедры надежности и ремонта машин, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул.С. Ефремова, 25, 49600, Днепр, Украина, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.

Кобець Анатолій Степанович – доктор наук по державному управлінню, професор, ректор, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна.

Дирда Віталій Ілларіонович – доктор технічних наук, професор, завідуючий відділом еластомерних конструкцій гірничих машин, Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, 49600, Україна, e-mail: vita.igtm@gmail.com.

Сокол Сергій Петрович – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна.

Черній Олександр Анатолійович – старший викладач кафедри надійності і ремонту машин, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.

Kobets Anatoliy – Doctor of Public Administration, Professor, Rector, Dnipro state agrarian-economic university, S. Efremova Str. , 25, 49600, Dnipro, Ukraine.

Dyrda Vitaly – Doctor of Technical sciences, professor, Head of Department of Elastomeric component Mechanics in Mining Machines, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine, Simferopolskaya Str., 2a, Dnipro, Ukraine, e-mail: vita.igtm@gmail.com.

Sokol Sergey – Candidate of Technical Science (Ph. D.) Dnipro state agrarian-economic university, S. Efremova Str. , 25, 49600, Dnipro, Ukraine.

Cherniy Alexandr – Senior Teacher of Department «Reliability and repair of machines», Dnipro state agrarian-economic university, S. Efremova Str. , 25, 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: sanek20.1984@gmail.com.