



**О РАСШИРЕНИИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ВИБРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ С УПРУГИМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ
ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

Е. Г. Куликова, А. В. Морозов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: shevchyk@ngs,
Красный проспект, 54, г. Новосибирск, Россия*

Описаны особенности конструкций вибрационных транспортирующих устройств с упругим рабочим органом, преимущественно питателей, разработанных в ИГД СО РАН. С целью увеличения дальности транспортирования и возможности использования таких машин в различных технологиях переработки полезных ископаемых предложено использование в их приводе дополнительного виброисточника. Путем физического моделирования исследована динамика упругого рабочего органа при работе двух вибровозбудителей в синхронном режиме и режиме биений. Определены условия устойчивости и ограничения использования того и другого режима.

Упругий рабочий орган, дебалансный вибровозбудитель, рассогласование парциальных частот, длина волны, синхронный режим, режим биений

**EXPANDING THE POSSIBILITIES OF USING VIBRATORY DEVICES
WITH ELASTIC ACTUATORS TO TRANSPORT AND PROCESS MINERALS**

E. G. Kulikova and A. V. Morozov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: shevchyk@ngs.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The design features of vibratory transporting devices with elastic actuators, mainly feeders, developed at the Chinakal Institute of Mining SB RAS are described. In order to increase the distance of transportation and the possibility of using such machines in various technologies for processing minerals, it is proposed to use an additional vibration source in their drive. The dynamics of an elastic actuator was investigated during the operation of two vibration exciters in a synchronous mode and a beat mode by physical modeling. The conditions of stability are found and the scope of application of both modes is determined.

Elastic actuator, unbalanced vibration exciter, mismatch of partial frequencies, wavelength, synchronous mode, beat mode

Среди технических средств, используемых для реализации различных технологий добычи и переработки полезных ископаемых вибрационные машины занимают особое место благодаря возможности автоматизации выполняемых операций, простоте конструкции и удобству обслуживания [1–5]. В ИГД СО РАН проводятся исследования процессов взаимодействия вибрационных рабочих органов машин с сыпучими материалами, результаты которых являются основой для создания высокоэффективных технических средств для выпуска, транспортирования и уплотнения геоматериалов с различными физико-механическими свойствами [6].

Одними из первых вибрационных транспортирующих машин, разработанных в лаборатории, являются устройства с упругим рабочим органом под общим названием “виброленты”, предназначенные для эксплуатации в различных условиях как при подземной, так и открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Принципиальное отличие этих машин состоит в том, что рабочий орган — металлический лист малой изгибной жесткости — свободно укладывается на раму и совершает волновое движение, изгибаясь под действием виброисточника. Отсутствие системы упругих связей между рабочим органом и основанием дало возможность использовать виброленты под любыми завалами горной массы в условиях значительных динамических нагрузок, изменяющихся по величине в широком диапазоне [7]. Исследования показали, что колебания, передаваемые на опорную раму, по амплитуде в десятки раз меньше колебаний рабочего органа. Кроме того, эти машины просты по конструкции и монтажу и имеют широкие возможности реализации различных режимов вибротранспортирования.

При всех достоинствах классические виброленты имеют ограниченную область применения, что связано с интенсивным затуханием колебаний, передаваемых от виброисточника вдоль транспортирующей поверхности под завалом, и, как следствие, с малой дальностью перемещения сыпучего материала. Выравнивание интенсивности колебаний всего рабочего органа позволит увеличить его протяженность и использовать такие виброустройства не только для выпуска сыпучих материалов из накопительных емкостей, но и в других технологиях, например, при просушивании геоматериалов после обогащения.

Одним из решений данной задачи является замена одного мощного виброисточника несколькими с меньшей вынуждающей силой. При этом наиболее щадящим режимом работы для дебалансных вибровозбудителей является синхронный, который может быть достигнут без дополнительных механических связей за счет способности виброисточников к самосинхронизации [8–10]. В связи с этим были сделаны попытки создать транспортирующее устройство с упругим органом и двумя самосинхронизирующимися источниками колебаний [11]. Однако устойчивость синхронного режима зависит от изменения нагрузки со стороны перемещаемого материала и расстояния между вибровозбудителями. Режим биений редко применяется при транспортировании и проектировании машин с упругим рабочим органом не рассматривался.

Целью исследований являлось экспериментальная проверка эффективности работы двух дебалансных вибровозбудителей, закрепленных на рабочем органе малой изгибной жесткости, в синхронном режиме и режиме биений, определение условий устойчивости и ограничений применения каждого из этих режимов.

Методика исследований. Эксперименты выполнялись методом физического моделирования на стенде, включающем в себя накопительную емкость с прозрачными стенками и вибрационное устройство (рис. 1). Жесткость рабочего органа виброустройства принималась из условия его волнового движения [12] и равнялась $154 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$. Для обеспечения транспортирующего эффекта рабочий орган укладывался на раму 2 под углом наклона к горизонту 15° и прикрывался вдоль боковых граней элементами 3 (тонкими полосами из прессованной резины), закрепленными на раме 2 и предотвращающими просыпи сыпучего материала во время работы.

В качестве источников колебаний применялись два дебалансных вибровозбудителя 4 типа RZHF 40 (Knauer Engineering, Германия) с максимально возможным статическим моментом $0.021 \text{ кг}\cdot\text{м}$ и частотой вращения ротора, варьируемой в диапазоне $36\text{--}49 \text{ Гц}$ с помощью электронных преобразователей частоты. Один из вибровозбудителей был постоянно закреплен на разгрузочном участке рабочего органа (ниже по уклону) в положении В1, а второй (положение В2) попеременно закреплялся на его центральном или загрузочном участке с соответствующим изменением расстояния между вибровозбудителями l с 0.34 на 0.85 м .

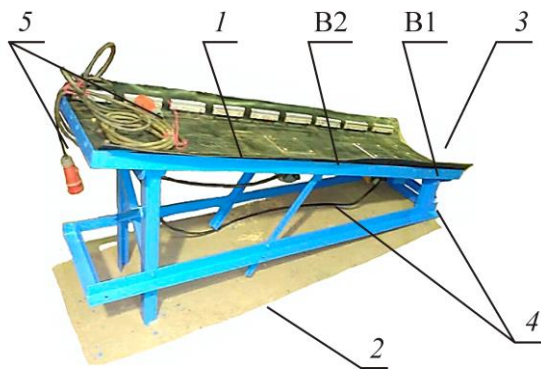


Рис. 1. Схема модели вибротранспортирующего устройства: 1 — упругий рабочий орган; 2 — опорная рама; 3 — элементы предотвращения просыпей сыпучего материала; 4, B1, B2 — вибровозбудители и положения их закрепления соответственно; 5 — силовые кабели

Исследовалась динамика рабочего органа в ненагруженном состоянии под действием технологической нагрузки, которая создавалась мелкодисперсным сыпучим материалом с равномерно распределенным погонным весом вдоль транспортирующей поверхности устройства 2.86 кН/м. Скорость движения сыпучего материала при включенных вибровозбудителях находилась усреднено по времени выпуска мерного объема.

Во время проведения каждого эксперимента одновременно определялась виброскорость в трех точках рабочего органа (участки закрепления вибровозбудителей и центральный участок). Для этого в каждой контрольной точке фиксировались колебания в направлении нормальном к транспортирующей поверхности виброустройства $v_{\text{норм}}$ и в направлении продольном ей $v_{\text{прод}}$, а затем вычислялось результирующее значение

$$v_{\text{рез}} = \sqrt{v_{\text{норм}}^2 + v_{\text{прод}}^2}.$$

Рассогласование парциальных частот устанавливалось опосредованно в виде разности

$$\Delta f = f_1 + f_2,$$

где f_1 и f_2 — частота вынужденных колебаний рабочего органа, создаваемых при отдельном включении вибровозбудителя сначала на участке B1, а потом на B2.

Результаты и обсуждение. Результаты измерений показали, что вследствие различия условий закрепления вибровозбудителей по длине рабочего органа малой изгибной жесткости круговая вынуждающая сила каждого из них вызывает эллиптические колебания участков транспортирующей поверхности, на которых они прикладываются, разной формы (рис. 2). Амплитуды результирующих колебаний и углы их наклона α_1 и α_2 относительно начального положения рабочего органа различны, поэтому несмотря на равенство вынуждающих сил и задаваемых частот вращения дебалансов, формы изгибных волн, создаваемых вибровозбудителями, отличаются и влияние виброисточников друг на друга неодинаково.

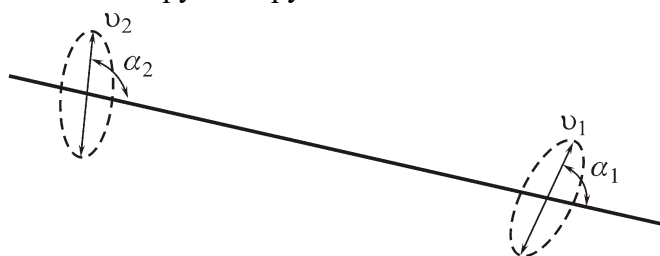


Рис. 2. Траектории колебаний упругого рабочего органа, создаваемых круговыми силами вибровозбудителей: v_1 , v_2 — векторы амплитуды виброскорости; α_1 , α_2 — угол наклона векторов v_1 , v_2 к поверхности рабочего органа

При установлении синхронного режима работы вибровозбудителей формируется общая изгибаемая волна рабочего органа, поддерживаемая обеими круговыми вынуждающими силами (рис. 3).

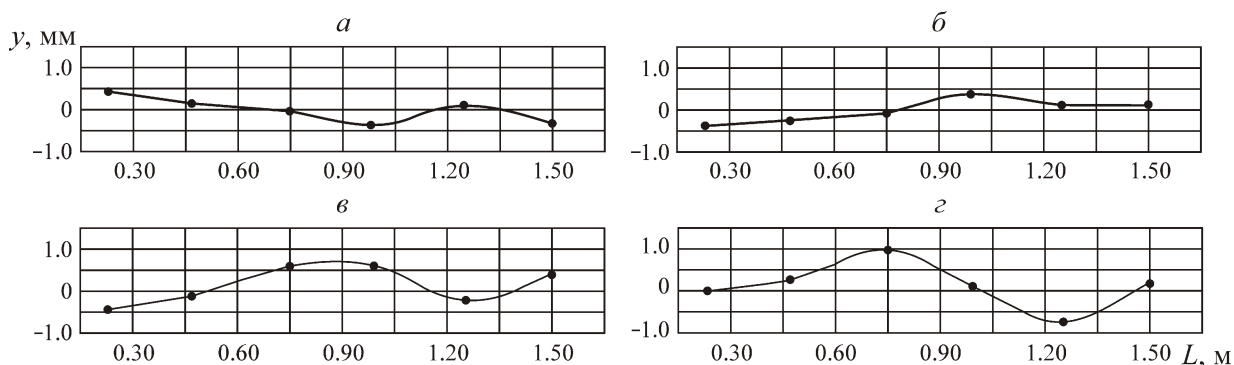


Рис. 3. Изменение формы ненагруженного рабочего органа в течение одного периода колебаний при синхронном режиме работы вибровозбудителей ($f_1 = f_2 = 49$ Гц)

В процессе настраивания виброисточников друг на друга амплитуды результирующих колебаний каждой точки рабочего органа (рис. 4а) и угол их наклона (рис. 4б) постепенно приобретают определенное значение, которое сохраняется до выключения вибровозбудителей при условии отсутствия или постоянства давления сыпучего материала.

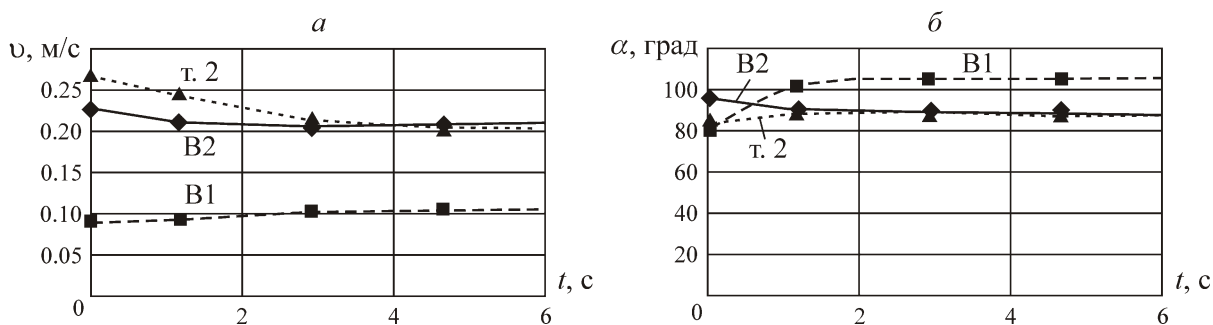


Рис. 4. Изменение амплитуды виброскорости v (а) и угла наклона результирующей амплитуды α (б) в процессе самосинхронизации вибровозбудителей: В1, В2, т. 2 — участки закрепления вибровозбудителей и центральная точка рабочего органа соответственно

Экспериментально установлено, что синхронный режим устойчив, если отношение погонного веса сыпучего материала к вынуждающей силе каждого из источников колебаний не превышает значения 0.6–0.7, а длина волны, формируемой в упругом рабочем органе, не менее 1.7–2.0 расстояния между вибровозбудителями. В этом случае использование двух самосинхронизирующихся дебалансных вибровозбудителей позволяет увеличить длину транспортирующей поверхности с равной амплитудой колебаний. Такие вибрационные машины с упругим рабочим органом могут эффективно применяться в конструкциях отвалообразователей или кузовов большегрузных автосамосвалов, повышая скорость и эффективность их разгрузки.

С увеличением расстояния l при синхронном режиме работы вибровозбудителей в центральной точке транспортирующей поверхности устройства возникает своеобразная “мертвая зона”, в которой амплитуда колебаний значительно меньше амплитуды колебания на участках приложения вынуждающей силы, независимо от значения последней. При перемещении влажного сыпучего материала это приводит к замедлению его движения на центральном участке рабочего органа. Постепенно материал скапливается, слипается и теряет свою подвижность, не сдвигаясь с места практически до момента освобождения от него разгрузочного участка и уменьшения общей нагрузки на рабочий орган, что снижает эффективность действия вибротранспортирующего устройства.

В этом случае предпочтительнее запуск виброисточников в режиме биений, при котором возникает периодическое изменение угла наклона результирующих колебаний В1 и В2 относительно друг друга (рис. 5б), что вызывает увеличение амплитуды колебаний в центральной точке рабочего органа (рис. 5а). Сыпучий материал, расположенный на этом участке разрыхляется и скорость его движения выравнивается вдоль всей транспортирующей поверхности устройства. Как показали результаты физического эксперимента, при всех равных конструктивных параметрах транспортирующего устройства в синхронном режиме работы вибровозбудителей мерный объем сыпучего материала выпускается при частоте вынужденных колебаний 49 Гц, а в режиме биений — 36 ± 5 Гц, что при постоянном статическом моменте дебалансов снижает требуемую вынуждающую силу в 1.4–2.5 раза, обеспечивая напряжено-деформированное состояние рабочего органа практически неизменным, а условия работы вибровозбудителей щадящими. Вследствие малой изгибной жесткости и волновому режиму движения рабочего органа, динамическая нагрузка на раму виброустройства практически не изменяется при переходе от синхронного режима к режиму биений.

Режим биений более устойчив. Достаточно рассогласования частот вибровозбудителей ± 5 Гц для того, чтобы он сохранялся в процессе всего выпуска мерного объема сыпучего материала в независимости от технологической нагрузки на транспортирующую поверхность устройства. Экспериментально установлено, что при неизменных вынуждающей силе и частоте вращения дебалансов вибровозбудителей время выпуска в режиме самосинхронизации и в режиме биений практически одинаково.

Таким образом, благодаря применению инерционных вибровозбудителей, работающих в режиме биений, появляется возможность создавать виброустройства с протяженным упругим рабочим органом малой изгибной жесткости, которые могут использоваться как самостоятельные машины, так и в конструкциях других машин, например, устройств для просушивания сыпучих материалов [13], применяемых в технологиях обогащения [14].

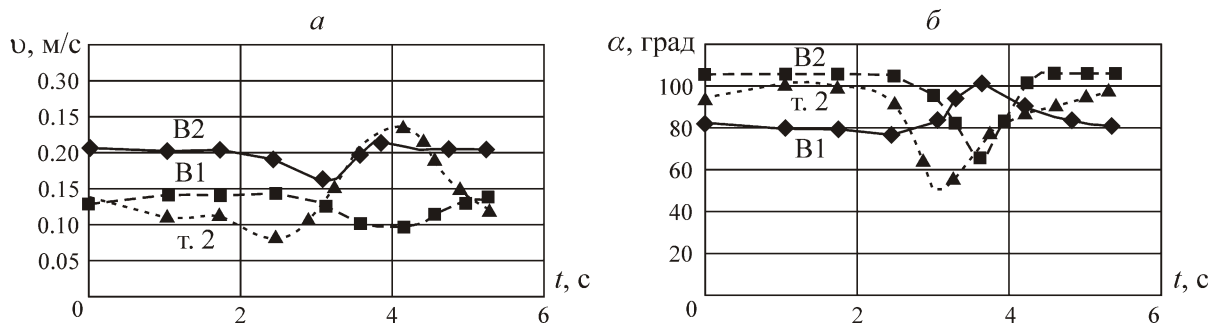


Рис. 5. Изменение амплитуды виброскорости v (а) и угла наклона результирующей амплитуды α (б) при биениях: В1, В2, т. 2 — участки закрепления вибровозбудителей и центральная точка рабочего органа соответственно

ВЫВОДЫ

Возможность реализации различных режимов вибротранспортирования позволяет расширить область применения вибрационных транспортирующих машин с упругим рабочим органом, используя их в конструкциях различного оборудования, применяемого на предприятиях горной промышленности (самосвалы, отвалообразователи, сушильное оборудование и т. д.). Для увеличения длины упругого рабочего органа и обеспечения требуемой в различных технологиях дальности транспортирования сыпучего материала один мощный привод может быть заменен на несколько, но с меньшей мощностью. Если отношение погонного веса сыпучего материала к вынуждающей силе виброисточника не превышает 0.6–0.7, а отношение изгибной

волны к расстоянию между участками приложения вынуждающей силы не менее 1.7–2.0, то предпочтителен синхронный режим работы, обеспечиваемый способностью дебалансных вибровозбудителей к самосинхронизации. При уменьшении жесткости рабочего органа и, соответственно, длины волны возможным и более эффективным является режим биений, устойчивость которого сохраняется при разности парциальных частот ± 5 Гц в независимости от величины технологической нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Molotilov S. G., Vasil'yev Ye. I., Kortyelyev O. B., et al.** Intensification of loading and transport operations on quarry, Novosibirsk, 2000. (in Russian) [**Молотилов С. Г., Васильев Е. И., Кортелев О. Б. и др.** Интенсификация погрузочно-транспортных работ на карьерах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.]
2. **Buzzoni M., Battia M., Mucchi E., and Dalpiaz G.** Motion analysis of a linear vibratory feeder: Dynamic modeling and experimental verification, *Mechanism and machine theory*, 2017, vol. 114.
3. **Lyashenko V. I., Dyatchin V. Z., and Franchuk V. P.** The creation and implementation of the vibratory feed unit-screens for the mining industry, *J. Ferrous Metallurgy*, 2014, no. 5, pp. 72–80. (in Russian) [**Ляшенко В. И., Дятчин В. З., Франчук В. П.** Создание и внедрение вибрационных питателей-грохотов для горной промышленности // *Черная металлургия*. — 2014. — № 5 — С. 72–80.]
4. **Fluid bed dryers**, <https://www.carriervibrating.com/industries-applications/mining-minerals-coal> [**Сушилки с виброкипящим слоем**. — <https://www.carriervibrating.com/industries-applications/mining-minerals-coal>]
5. **Eriez Vibratory Conveyors** – Site access mode: <https://www.eriez.com/NA/EN/Products/Feeders-and-Conveyors/Vibratory-Conveyors.htm>
6. **Levenson S. Ya., Gendlina L. I., Eremenko Yu. I., and Kulikova E. G., and Morozov A. V.** Vibratory equipment for underground and open cast mining, *Technical Equipment for the Mining and Oil and Gas Industry*, Works VI of the international scientific and technical conference, Ekaterinburg, 2008. (in Russian) [**Левенсон С. Я., Гендлина Л. И., Еременко Ю. И., Куликова Е. Г., Морозов А. В.** Вибромашины для подземных и открытых горных работ // *Техническое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов VI Междунар. науч.-техн. конф.* — Екатеринбург. — 2008.]
7. **Tishkov A. Ya., Gendlina L. I., and Levenson S. Ya.** Vibratory equipment with flexible active member to mining operations, *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 1992, no. 10, pp. 117–120. (in Russian) [**Тишков А. Я., Гендлина Л. И., Левенсон С. Я.** Вибрационные машины с упругим рабочим органом для горного производства // *Изв. вузов. Горный журнал*. — 1992. — № 10. — С. 117–120]
8. **Blekhman I. I.** Synchronization of dynamic systems, Moscow, Nauka, 1971, 894 pp. (in Russian) [**Блехман И. И.** Синхронизация динамических систем. — М.: Наука, 1971. — 894 с.]
9. **Blekhman I. I., Vasil'kov V. B., and Yaroshevich N. P.** About some possibilities of improving vibration machines with self-synchronizing inertial vibration exciters, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2013, pp. 18–22. (in Russian) [**Блехман И. И., Васильков В. Б., Ярошевич Н. П.** О некоторых возможностях совершенствования вибрационных машин с самосинхронизирующимися инерционными вибровозбудителями // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. — 2013. — № 3. — С. 18–22.]
10. **Yaroshevich T. S., Timoshuk V. N., and Yaroshevich N. P.** Dynamic synchronization of unbalanced vibration exciters with multiple rotational frequencies, *SevNTU Messenger*, 2011, pp. 228–233. (in Russian) [**Ярошевич Т. С., Тимошук В. Н., Ярошевич Н. П.** Динамическая синхронизация дебалансных вибровозбудителей с кратными частотами вращения // *Вестник СевНТУ*. — 2011. — № 120. — С. 228–233.]

11. **Protasov S. I., Molotilov S. G., Levenson S. Ya, and Gendlina L. I.** Vibration conveyor test results, manuscript, no. 1634, Kemerovo, 1979, 9 pp. (in Russian) [**Протасов С. И., Молотилов С. Г., Левенсон С. Я., Гендлина Л. И.** Результаты испытания вибрационного конвейера. – Рукопись деп. в ЦНИЭИУголь, №1634. — Кемерово, 1979. — 9 с.]
12. **Krejmer V. I. and Tishkov A. Ya.** Vibroment oscillations and their attenuation along the length, Mining Journal, 1972, pp. 111–115. (in Russian) [**Креймер В. И., Тишков А. Я.** Колебания виброленты и их затухание по длине // ФТПРПИ. — 1972. — № 3. — С. 111–115.]
13. **Kulikova E. G. and Dudina A. M.** Test bench to study drying of geomaterials in vibratory conveying // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science [Electronic resource], 2021, vol. 773.
14. **Handbook** of enrichment of ores. Special and auxiliary processes, enrichment testing, control and automation, Moscow, Nedra, 1983, vol. 3, 373 pp. (in Russian) [**Справочник** по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы, испытания обогатимости, контроль и автоматика. — М.: Недра, 1983. — Т. 3. — 373 с.]