

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВИБРАЦИОННОГО ПИТАТЕЛЯ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ**

© Н. Н. Денцов

*Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева  
Россия, 603950 г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.*

*Тел.: +7 (831) 436 03 01.*

*Email: dentsovnm90@mail.ru*

*Проведено экспериментальное исследование работы опытного образца вибрационного питателя на комбинационном параметрическом резонансе. В колебательной системе реализуется обобщенный принцип самосинхронизации. Это возможно благодаря использованию двух параметрических вибраторов с инерционными элементами, состоящими из набора дисков и тел качения. Доказано значительное уменьшение паразитных колебаний. Получены значения ускорений на рабочем органе в стационарном режиме при работе с одним и двумя параметрическими вибраторами. Определена точка бифуркации с помощью экспериментальной амплитудно-частотной характеристики установки. Определен порог возбуждения резонансных параметрических колебаний.*

**Ключевые слова:** параметрический резонанс, возбуждение колебаний, вибрационный питатель, параметрический вибратор, устойчивость колебаний.

**Введение**

В сырьевых и перерабатывающих отраслях мировой промышленности для транспортирования и переработки различных сыпучих и кусковых материалов широко применяются вибрационные транспортно-технологические машины. Одной из основных машин данного типа является вибрационный питатель. В промышленности посредством вибрационного транспорта перемещаются глыбы весом более тонны, мелкодисперсный порошок сажи или графита, который распыляется даже от дыхания человека, шайбы и гайки, смазанные маслом и прилипающие желобу, детали электронных схем, которые нужно не только переместить, но и выставить в определенном месте с точностью до микрона [1]. На вибрирующей поверхности груз подвергается действию периодически меняющихся, сдвигающих его сил и переменных сил трения. Направленное движение груза осуществляется вследствие того, что смещение его в одном направлении происходит в условиях меньших сил трения, чем в другом.

Наиболее простыми в конструктивном отношении и надежными в эксплуатации являются одноприводные одномассные питатели, снабженные центробежными (дебалансными) вибраторами направленного действия. Одномассные вибрационные питатели работают в режиме вынужденных колебаний с зарезонансной настройкой [2–3]. Зарезонансный режим работы является энергетически неэффективным и для преодоления резонансной зоны колебаний необходимо использовать двигатели, мощность которых в 2–3 раза превышает необходимую для технологического процесса. Резонансные режимы работы практически нереализуемы из-

за их низкой стабильности при обычном резонансе вынужденных колебаний, но они являются намного эффективнее и энергетически выгодными. Амплитудно-частотная характеристика резонансного режима крайне крутая и узкая, поэтому даже небольшие изменения технологической нагрузки выводят машину из резонансного режима [4–5].

Положительные результаты по стабилизации резонансного режима удалось получить на основе использования комбинационного параметрического резонанса. Стабилизация резонансного режима позволит создать целый ряд новых энергосберегающих высокоэффективных вибрационных машин.

**Метод исследования**

Для определения технических характеристик вибрационного питателя с параметрическим возбуждением была создана опытная установка, изображенная на *рис. 1*.

Представленная установка состоит из основания 1, рабочего органа 2, который соединен с основанием с помощью упругой системы, которая состоит из винтовых пружин 3. Через промежуточную плиту к установке крепятся два параметрических вибратора 4 [6], общий вид которого показан на *рис. 2*. Рабочий орган имеет малый угол наклона (2–3°) для лучшей транспортировки сыпучего материала [7]. С согласованной работой двух вибраторов на рабочем органе достигается благодаря обобщенному принципу самосинхронизации [8–9]. Параметрический вибратор состоит из инерционного элемента (ИЭ) с четырьмя телами качения, закрепленного на валу электродвигателя СЛ – 521 М мощностью 77 Вт (*рис. 2*). Во время своей работы тела качения ИЭ совершают колебательные движения по беговым дорожкам, которые являются голономными стационарными связями для тел качения.



Рис. 1. Общий вид опытного образца.



Рис. 2. Параметрический вибратор

Сбор и обработка данных о работе вибрационного питателя осуществлялся с помощью специализированного оборудования: виброанализатор LMS SCADAS SCM-18 и акселерометр PCB Piezotronics 333B32.

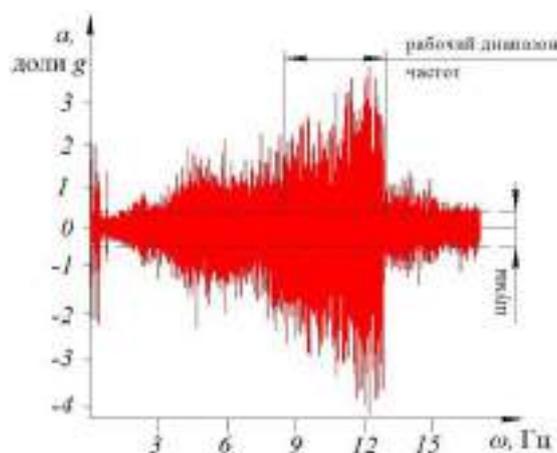
Данные, полученные с виброанализатора, транслировались и обрабатывались с помощью специального программного обеспечения LMS Test Lab [10].

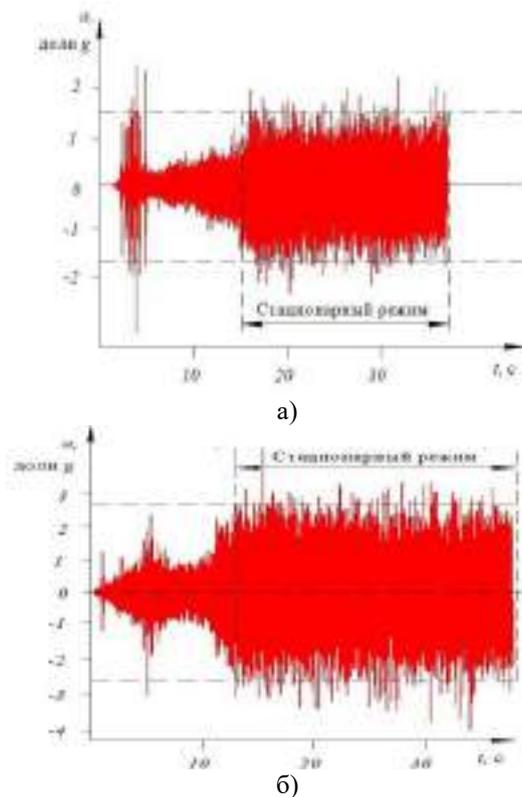
#### Результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента была получена зависимость ускорений на поверхности рабочего органа

от частоты колебаний его колебаний, представленные на *рис. 3*. На представленном рисунке видно, что ускорения во всей рабочей лежат в диапазоне от 1.6 до 3.7 g, что является оптимальным для транспортировки сыпучих материалов [11].

Были определены ускорения на поверхности рабочего органа питателя при стационарном режиме работы одного параметрического вибратора и при совместной синхронизированной работе двух параметрических вибраторов, представленные на *рис. 4*.

Рис. 3. Зависимость  $a(\omega)$  ускорений на рабочем органе от частоты колебаний рабочего органа.

Рис. 4. Зависимость  $a(t)$ :

а – с одним параметрическим вибратором;  
б – с двумя параметрическими вибраторами.

Из рис. 4,а видно, что ускорения, полученные при работе с одним вибратором малой мощности, сопоставимы с ускорениями используемых промышленных машин, несмотря на малые габариты демонстрационного образца.

Совместная работа двух вибраторов приводит к росту ускорений на поверхности рабочего органа за счет увеличения суммарной мощности вибраторов и синхронизированной работы тел качения. При работе одного вибратора ускорения находятся в районе 1.5g, то для двух вибраторов порядка 2.8g (рис. 4б). Максимальные значения ускорений достигают значений до 3.8 g. Значения ускорений, полученные на рабочей поверхности, являются достаточно большими для обеспечения широкого спектра технологических операций. Данные значения ускорений позволяют транспортировать липкие

материалы и разделять на фракции материалы с минимальными временными затратами на чистку просеивающих поверхностей. Такими характеристиками обладают только передовыми вибрационными машинами технологического назначения [12].

Совместная работа двух параметрических вибраторов позволяет существенно снизить паразитные колебания рабочего органа, что приводит к увеличению срока службы вибрационной установки и уменьшению вредного воздействия на окружающие конструкции и людей [13].

Изменяя частоту вращения вибратора (частоту генерации)  $\Omega$  с помощью частотного преобразователя, была получена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) рабочего органа, представленная на рис. 5.

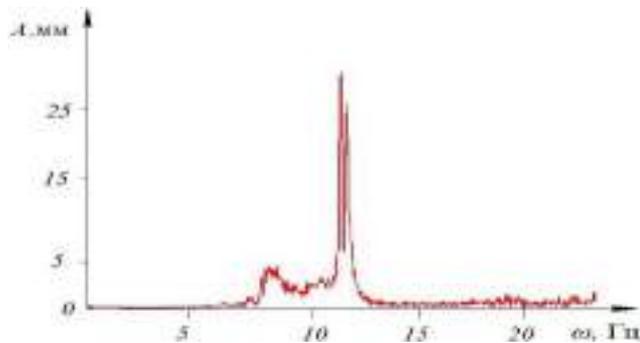


Рис. 5. Экспериментальная АЧХ рабочего органа.

Таблица 1

Значения коэффициента возбуждения колебаний

Масса установки, кг	Масса тел качения, кг	Коэффициент порога возбуждения колебаний $\varepsilon$	Описание
24.1	0.20	$\varepsilon_1 = 0.008$	Колебания не возбуждались
24.1	0.27	$\varepsilon_2 = 0.011$	Колебания возбуждались при малом внешнем воздействии, возможен срыв колебаний
24.1	0.35	$\varepsilon_3 = 0.014$	Колебания возбуждались
24.1	0.4	$\varepsilon_4 = 0.016$	Колебания возбуждались

Двигатели параметрических вибраторов вращают роторы ИЭ с одинаковой частотой в противоположные стороны, что позволяет реализовать однонаправленное движение рабочего органа и значительно уменьшить паразитные колебания. По достижению частоты вращения 7.4 Гц (точка бифуркации), колебательная система теряет положение равновесия, и возбуждаются колебания. Рабочая область колебаний находится в диапазоне от 7.4 до 12.4 Гц, т.е. ширина первой формы резонансных колебаний составляет 5 Гц. На частоте 12.4 Гц происходит резкий срыв колебаний, и система за короткое время возвращается в положение равновесия. При данных частотах амплитуда колебаний находится в диапазоне от 4 до 27 мм. Это представляет большой интерес, поскольку транспортировка и грохочение мелкодисперстных материалов и нанопорошков должны происходить на низких частотах, но при достаточно большой амплитуде колебаний [14].

Использование параметрического резонанса, так и резонанса в целом, возможно лишь при стабильной работе технологической машины, поэтому была исследована устойчивость стационарного режима работы вибрационного питателя. Во время работы на опытный образец оказывалось внешнее воздействие в виде толчков, ударов и технологической нагрузки (транспортируемый материал: песок, мелкий гравий, гайки). При внешнем воздействии устойчивость стационарного режима работы не терялась, что соответствует определению устойчивости по Ляпунову [15]. Полученный результат подтверждает теоретические данные, полученные в работах [16–17].

В ходе экспериментов был определен порог возбуждения колебаний [18–19] для опытной установки. Величиной характеризующей порог возбуждения колебаний вибрационной машины является отношение массы тел качения ко всей массе системы  $\varepsilon$ . Чтобы определить значение  $\varepsilon$  использовались инерционные элементы с различной массой тел качения. Масса колеблющейся части установки состоит из массы масса рабочего органа  $m_{\delta.i} = 14.9$  кг, масса двух параметрических вибраторов  $m_{\hat{a}\hat{e}\hat{a}\hat{d}} = 8.0$  кг и массы крепежной пластины

$m_{\hat{i}\hat{e}} = 1.2$  кг. Результаты эксперимента по определению порога возбуждения сведены в табл. 1.

В первых двух случаях колебания не возбуждались без внешнего воздействия на установку ( $\varepsilon_1=0.008$  и  $\varepsilon_2=0.011$ ), для третьего и четвертого случаев колебания сразу возбуждаются, а система выходит на устойчивый стационарный режим работы ( $\varepsilon_3=0.014$  и  $\varepsilon_4=0.016$ ).

### Выводы

Из полученных экспериментальных данных видно, что для изготовленного опытного образца пороговое условие возбуждения колебаний  $\varepsilon \geq 0.014$ . Малой массой тел качения удастся раскачать тяжелый рабочий орган машины и обеспечить высокую стабильность резонансных колебаний благодаря параметрическому вибратору. Также параметрический резонанс позволяет значительно снизить энергетические затраты [20–21], связанные с обеспечением технологического процесса. Экспериментальные кривые говорят о высоких качественных и количественных показателях опытного образца. Экспериментальное исследование подтверждает полученные ранее теоретические результаты [22–25] о работе вибрационной машины с параметрическим вибратором.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаревич И. Ф. Вибрация – нестандартный путь. М.: Наука, 1986. 209 с.
2. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 894 с.
3. Блехман И. И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. 352 с.
4. Гончаревич И. Ф. Динамика вибрационного транспортирования. М.: Наука, 1972. 212 с.
5. Вайсберг Л. А. Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М.: Недра, 1986. 114 с.
6. Антипов В. И. Вибровозбудитель: патент РФ №2072661; опубл. 27.01.1997; бюл. №3.
7. Палеев В. А. Основы расчета вибрационной техники в строительных и дорожных машинах: учебное пособие. Омск: СибАДИ. 2009. 108 с.
8. Антипов В. И. Динамика вибрационных машин с комбинационным параметрическим возбуждением // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2001. №2. С. 13–17.
9. Антипов В. И. Самоорганизация в резонансных системах с параметрическим возбуждением // Вестник Нижегородского ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2012. №4(1). С. 177–182.

10. Гимадиев А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах: электрон. учеб. пособие / А. Г. Гимадиев, П. И. Грешняков, А. Ф. Синяков. Электрон. текстовые и граф. дан. Самара: изд-во СамНЦ РАН, 2014.
11. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. М.: Высшая школа, 1977. 255 с.
12. Вибрация в технике: справ. М.: Машиностроение, 1981. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова. 456 с.
13. Вибрация в технике: справ. М.: Машиностроение, 1979. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / под ред. И. И. Блехмана. 351 с.
14. Вибрация в технике: справ. М.: Машиностроение, 1981. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела 509 с.
15. Устойчивость движения и равновесия: учебник для вузов / Алфуртов Н. А., Колесников К. С.; ред. К. С. Колесников. 2-е изд., стер. М.: изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. 252 с.
16. Денцов Н. Н. Динамика вибрационного грохота на комбинационном параметрическом резонансе: автореф. ... канд. техн. наук. Нижний Новгород, НГТУ, 2015. 16 с.
17. Денцов Н. Н., Миронов А. А. Исследование устойчивости стационарного режима работы вибрационного грохота с параметрическими вибровозбудителями // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1.
18. Асташев В. К. Авторезонансные системы возбуждения вибрационных машин // Наука производству. 1988. №10. С. 30–34.
19. Шмидт Г. Параметрические колебания. М.: Мир, 1978. 336 с.
20. Кошелев А. В. Эффективность вибрационной измельчительной машины с параметрическим возбуждением // Вестник Машиностроения. 2016. №5. С. 27–32.
21. Антипов В. И., Денцов Н. Н., Кошелев А. В. Энергетические соотношения в вибрационной машине на многократном комбинационном параметрическом резонансе // Вестник Нижегородского гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2013. №5. С. 188–194.
22. Кошелев А. В., Денцов Н. Н. Роторно-маятниковая самосинхронизация параметрических вибровозбудителей на изотропном упругом основании // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. №1. С. 150–159.
23. Кошелев А. В., Денцов Н. Н. Определение областей динамической неустойчивости в параметрических системах с малым коэффициентом возбуждения // Научный журнал «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование», Иркутск, 2017. С. 14–21.
24. Денцов Н. Н., Кошелев А. В. Перспективы многочастотных резонансов в современной промышленности // Тез. докл. XVI Междунар. молодежной научно-техн. конф. «Будущее технической науки». Нижний Новгород, 2017. С. 181.
25. Денцов Н. Н., Кошелев А. В. Динамика двухмассного резонансного вибрационного грохота в первом приближении // Вестник Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. №3. С. 148–157.

*Поступила в редакцию 12.01.2020 г.*

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2020.2.1

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE VIBRATION FEEDER WITH PARAMETRIC EXCITATION

© N. N. Dentsov

*Nizhny Novgorod State Technical University  
24 Minin Street, 603950 Nizhny Novgorod, Russia.*

*Phone: +7 (831) 436 03 01.*

*Email: dentsovnn90@mail.ru*

An experimental study of the operation of a vibrating feeder at combinational parametric resonance. The experimental sample consists of a working body, an elastic system, and a parametric vibrator. The oscillatory system implements the generalized principle of self-synchronization. This is possible due to the inertial element with rolling elements. Previously, in mechanics, it was not possible to use this type of synchronization in the device. The values of accelerations on the working body of the experimental setup in stationary mode are obtained when working with one and two parametric vibrators. The accelerations obtained in the experimental setup enable efficient transportation of bulk materials and fine powders. The bifurcation point is determined using the experimental amplitude-frequency characteristics of the installation. The bifurcation point is at a frequency of 7.4 Hz. At this frequency, resonant vibrations of the working body begin to be generated. The working region of the resonance is 5 Hz and it is wide enough to ensure the technological process. During operation, the machine seeks to maintain vibrations in this area. Thus, the machine itself regulates the technological process. It can be said that a machine with parametric excitation has “technical intelligence”. The actual threshold for the excitation of oscillations of the experimental setup is determined using the selection of vibrator parameters. The stability of resonant vibrations of a vibrating machine with parametric excitation of vibrations was experimentally proved. The theoretical results obtained earlier were experimentally confirmed. The parametric vibrator enables the resonance energy to be put into the technological process.

**Keywords:** parametric resonance, vibration excitation, vibration feeder, parametric vibrator, vibration stability.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at [bulletin\\_bsu@mail.ru](mailto:bulletin_bsu@mail.ru) if you need translation of the article.

## REFERENCES

1. Goncharevich I. F. *Vibratsiya – nestandartnyi put'* [Vibration – a non-standard way]. Moscow: Nauka, 1986.
2. Blekhman I. I. *Sinkhronizatsiya dinamicheskikh sistem* [Synchronization of dynamic systems]. Moscow: Nauka, 1971.
3. Blekhman I. I. *Sinkhronizatsiya v prirode i tekhnike* [Synchronization in nature and technology]. Moscow: Nauka, 1981.
4. Goncharevich I. F. *Dinamika vibratsionnogo transportirovaniya* [Dynamics of vibration transportation]. Moscow: Nauka, 1972.
5. Weisberg L. A. *Proektirovanie i raschet vibratsionnykh grokhotov* [Design and calculation of vibrating screens]. Moscow: Nedra, 1986.
6. Antipov V. I. *Vibrovozbuditel'*: patent RF No. 2072661; opubl. 27.01.1997; byul. No. 3.
7. Paleev V. A. *Osnovy rascheta vibratsionnoi tekhniki v stroitel'nykh i dorozhnykh mashinakh: uchebnoe posobie* [Basics of calculation of vibration technology in construction and road machines: textbook]. Omsk: SibADI. 2009.
8. Antipov V. I. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*. 2001. No. 2. Pp. 13–17.
9. Antipov V. I. *Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N. I. Lobachevskogo*. 2012. No. 4(1). Pp. 177–182.
10. Gimadiev A. G. *LMS Imagine.Lab AMESim kak effektivnoe sredstvo modelirovaniya dinamicheskikh protsessov v mekhatronnykh sistemakh: elektron. ucheb. posobie* [Imagine.Lab AMESim as effective means of modeling dynamic processes in mechatronic systems: electronic textbook] / A. G. Gimadiev, P. I. Greshnyakov, A. F. Sinyakov. *Elektron. tekstovye i graf. dan. Samara: izd-vo SamNTs RAN*, 2014.
11. Bauman V. A., Bykhovskii I. I. *Vibratsionnye mashiny i protsessy v stroitel'stve* [Vibration machines and processes in construction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977.
12. *Vibratsiya v tekhnike: sprav. Vol. 6. Zashchita ot vibratsii i udarov* [Vibration in technology: reference book. Vol. 6. Protection against vibration and shock]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. Ed. K. V. Frolov.
13. *Vibratsiya v tekhnike: sprav. Vol. 2. Kolebaniya nelineinykh mekhanicheskikh sistem* [Vibration in technology: reference book. Vol. 2. Vibrations of nonlinear mechanical systems]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. Ed. I. I. Blekhman.

14. Vibratsiya v tekhnike: sprav. Vol. 4. Vibratsionnye protsessy i mashiny [Vibration in technology: reference book. Vol. 4. Vibration processes and machines. Moscow: Mashinostroenie, 1981. Ed. E. E. Lavendel
15. Ustoichivost' dvizheniya i ravnovesiya: uchebnik dlya vuzov [Stability of movement and balance: textbook for universities] / Alfutov N. A., Kolesnikov K. S.; red. K. S. Kolesnikov. 2 ed., ster. Moscow: izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2003.
16. Dentsov N. N. Dinamika vibratsionnogo grokhota na kombinatsionnom parametricheskom rezonanse: avtoref. ... kand. tekhn. nauk. Nizhnii Novgorod, NGTU, 2015.
17. Dentsov N. N., Mironov A. A. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2015. No. 1.
18. Astashev V. K. Nauka proizvodstvu. 1988. No. 10. Pp. 30–34.
19. Schmidt G. Parametricheskie kolebaniya [Parametric vibrations]. Moscow: Mir, 1978.
20. Koshelev A. V. Vestnik Mashinostroeniya. 2016. No. 5. Pp. 27–32.
21. Antipov V. I., Dentsov N. N., Koshelev A. V. Vestnik Nizhegorodskogo gos. un-ta im. N. I. Lobachevskogo. 2013. No. 5. Pp. 188–194.
22. Koshelev A. V., Dentsov N. N. Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie. 2018. No. 1. Pp. 150–159.
23. Koshelev A. V., Dentsov N. N. Nauchnyi zhurnal «Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie», Irkut-sk, 2017. Pp. 14–21.
24. Dentsov N. N., Koshelev A. V. Tez. dokl. XVI Mezhdunar. molodezhnoi nauchno-tekhn. konf. «Budushchee tekhnicheskoi nauki». Nizhnii Novgorod, 2017. Pp. 181.
25. Dentsov N. N., Koshelev A. V. Vestnik Samarskogo un-ta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie. 2018. No. 3. Pp. 148–157.

*Received 12.01.2020.*