

УДК 625.76.08

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВЕСНЫХ ЭКСКАВАТОРНЫХ ВИБРОПЛИТ

И.С. Тюремнов, Д.В. Федорова
ФГБОУ ВО «ЯГТУ»,
г. Ярославль, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время производители навесных экскаваторных виброплит практически не дают рекомендаций по выбору модели и обоснованию режимов работы данного оборудования при уплотнении грунта в конкретных технологических условиях. Это обусловлено отсутствием методики определения результатов уплотнения грунта навесными экскаваторными виброплитами. Одним из этапов разработки данной методики должен быть анализ технических характеристик навесных экскаваторных виброплит, отражающий многолетний опыт производства и эксплуатации данного оборудования.

Материалы и методы. Статистическая обработка проводилась в программе «STATISTICA v.10» по данным технических характеристик 65 моделей навесных экскаваторных виброплит отечественных и зарубежных производителей.

Выводы. Установлено, что режимы работы навесных экскаваторных виброплит занимают промежуточное положение между режимами работы вибрационных катков и самоходных виброплит. Относительные вынуждающие усилия находятся в диапазоне, более близком к диапазону работы самоходных виброплит, а частоты колебаний находятся в диапазоне, более близком к диапазону работы вибрационных катков. Низкие значения коэффициента детерминации для значений частоты колебаний и относительного вынуждающего усилия в зависимости от массы оборудования также свидетельствуют об отсутствии у производителей единого мнения о требуемых характеристиках навесных экскаваторных виброплит и оценке их технологических возможностей.

В силу выявленного существенного превышения вынуждающего усилия навесных экскаваторных виброплит над их весом в процессе колебаний должен происходить периодический отрыв основания плиты от грунта, что должно учитываться при разработке математической модели взаимодействия навесных экскаваторных виброплит с грунтом.

Практическое значение. Результаты анализа позволили выявить особенности взаимодействия навесной экскаваторной виброплиты с уплотняемым грунтом и уточнить требования к будущей математической модели. Полученные регрессионные зависимости вынуждающего усилия и частоты колебаний, а также размеров основания навесных экскаваторных виброплит, массы экскаватора и требуемого расхода масла должны учитываться при разработке методики определения результатов уплотнения грунта навесными экскаваторными виброплитами в конкретных технологических условиях. Также полученные результаты могут быть использованы производителями при проектировании и модернизации конструкций навесных экскаваторных виброплит.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: грунт, уплотнение, вибрация, плита вибрационная, виброплита, виброплита экскаваторная навесная, анализ статистический, коэффициент детерминации, усилие вынуждающее, масса эксплуатационная, частота колебаний, размер основания, масса экскаватора.

© И.С. Тюремнов, Д.В. Федорова



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

STATISTICAL PROCESSING OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF VIBRATING PLATE COMPACTORS

I.S. Tyuremnov, D.V. Fedorova
Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russia

ABSTRACT

Introduction. Currently, manufacturers of vibrating plate compactors practically do not give recommendations on the choice of model and justification of the equipment operating modes when compacting the soil in specific process conditions. This is partially due to the lack of a methodology for determining the results of soil compaction with vibrating plate compactors. One of the development stages of such technique should be the analysis of the technical characteristics of vibrating plate compactors, which could reflect experience in the production and operation of the equipment.

Materials and methods. The authors conduct statistical processing of technical characteristics of vibrating plate compactors in STATISTICA 10 based on 65 models of various manufacturers from Russia and other countries.

Discussion and conclusions. The authors demonstrate that the operating modes of vibrating plate compactors are between the operating modes of vibrating rollers and self-propelled vibrating plate compactors. To note, relative driving forces are in a similar range as the working range of self-propelled vibrating plate compactors, and their vibration frequencies are in a similar range as the working range of vibrating rollers. Moreover, low values of the determination coefficient for oscillation frequency and relative forcing force depending on the mass of the equipment also indicate the lack of consensus among manufacturers about the required characteristics of vibrating plate compactors and an assessment of their technological capabilities.

Due to a significant excess of driving force of vibrating plate compactors over their weight, the base of the plate should come into partial uplift from soil, and that should be taken into account while the mathematical model of interaction development between vibrating plate compactors and soil.

Practical implications. The results of the analysis reveal the peculiarities of the vibrating plate compactors' interaction with the compacted soil and also clarify the requirements for the future mathematical model. The resulting regression dependencies of driving force and oscillation frequency, as well as the base dimensions of the vibrating plate compactors, the weight of the excavator and the required oil consumption should be taken into account when developing a methodology for determining the results of soil compaction with mounted technological excavator plates. Therefore, the obtained results could also be used by manufacturers in the design and modernization of the vibrating plate compactors' structures.

KEYWORDS: soil, compaction, vibration, vibrating plate, vibrating plate compactor, statistical analysis, determination coefficient, driving force, operating weight, vibration frequency, base size, excavator weight.

© I.S. Tyuremnov, D.V. Fedorova



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

При уплотнении грунтов обратных засыпок в траншеях, пазухах фундаментов, вокруг колодцев, над трубопроводами и в других «узких местах» используются навесные экскаваторные виброплиты (НВП), крепящиеся на стрелу экскаватора, что позволяет использовать их для уплотнения грунтов как на горизонтальных, так и на наклонных поверхностях (откосах выемок и насыпей). Данное оборудование имеет гидравлический привод от гидросистемы экскаватора и реализует круговые колебания с одним или двумя значениями вынуждающей силы. Для демпфирования динамических воздействий на стрелу экскаватора между вибровозбудителем (жестко связанным с основанием НВП) и адаптером для крепления НВП к стреле экскаватора установлены резиновые амортизаторы.

Обзор рекомендаций по оценке технологических возможностей навесных экскаваторных виброплит показал недостаток информации о возможностях НВП, а также отсутствие критериев выбора навесных экскаваторных виброплит для выполнения работ в различных технологических условиях. Производители ориентируются на базовую машину (НВП подбирается под массу экскаватора), а не на заданный объект работ. Отсутствие рекомендаций по обоснованию выбора модели НВП для обеспечения требуемого коэффициента уплотнения на заданной глубине грунта приводит к необходимости разработки методики расчета результатов уплотнения грунта при работе в конкретных технологических условиях. Одним из этапов разработки данной методики является анализ взаимосвязей между различными характеристиками НВП, реализованных производителями в конструкциях НВП на основании многолетнего опыта производства и эксплуатации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Статистическая обработка проводилась в программе «STATISTICA v.10» по техническим характеристикам 65 моделей НВП различных отечественных и зарубежных производителей: Традиция-К¹, Ammann², Atlas Copco³, Exten⁴, Gentec equipment⁵, Ghedini⁶, Impulse⁷, Indeco⁸, LST, MTS и Simex⁹. Вид уравнений регрессии выбирался по соображениям простоты и максимизации значения коэффициента детерминации (инструмент «User-Specified Regression»). Использовался метод оценивания «Quasi-Newton». В качестве функции остатков применялась функция минимизации квадратов разницы между наблюдаемыми и расчетными значениями. Для моделей НВП с несколькими значениями вынуждающего усилия для анализа использовалось максимальное его значение. Результаты обработки приведены на рисунках и в таблице.

Масса НВП является основной технической характеристикой виброплиты, во многом определяющей ее функциональные возможности. Таким образом, будет целесообразным выявить зависимости основных технических характеристик виброплит в функции их массы.

В полученных зависимостях приняты следующие обозначения: P – вынуждающее (центробежное) усилие, кН; B – ширина основания НВП, м; L – длина основания НВП, мм; F – частота колебаний, Гц; M – эксплуатационная масса НВП, кг; M_{sr} – усредненная масса экскаватора, т; Q – расход масла, л/мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ результатов статистической обработки характеристик виброплит показывает, что наибольшие значения коэффициента детерминации R^2 имеют зависимости вынуждающего усилия, длины и ширины основания НВП, а также усредненной массы экскаватора

¹ Ammann [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ammann-group.com>.

² AtlasCopco [Электронный ресурс]. URL: <http://atlas-co.ru/catalog/uplotniteli-kompaktnyye.html>.

³ Exten [Электронный ресурс]. URL: <https://extenfactory.com/vibrotrambovka-exten-tamp-300>.

⁴ Gentec equipment [Электронный ресурс]. URL: <https://genteequipment.com/3-hydraulic-plate-compactors>.

⁵ Ghedini [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ghedini.com/ru>.

⁶ Технопарк «Impulse» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.impulse.su/catalog/vibrotrambovki-na-eksavatory>.

⁷ Indeco [Электронный ресурс]. URL: <https://indecobreakers.com/compactors>.

⁸ Simex [Электронный ресурс]. URL: <https://www.simex.it/it-it/prodotti/categorie/piastre-vibranti-pv>.

⁹ Там же.

Таблица
Результаты статистической обработки технических характеристик НВП

Table
Statistical processing results of technical characteristics of the vibrating plate compactors VPC

Функция	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
$P = f(M)$	$P = 16,326 + 0,0110 \cdot M^{1,281}$	0,699
$F = f(M)$	$F = 46,512 - 0,008 \cdot M$	0,136
$Q = f(M)$	$Q = 26,948 + 0,139 \cdot M$	0,745
$Msr = f(M)$	$Msr = 1,556 + 0,020 \cdot M$	0,583
$L = f(M)$	$L = 582,929 + 1,311 \cdot M^{0,895}$	0,706
$B = f(M)$	$B = -149,727 + 69,764 \cdot M^{0,378}$	0,842
$P/Q = f(M)$	$P/Q = -391,644 + 411,106 \cdot M^{-0,004}$	0,0732

и требуемого расхода масла НВП от эксплуатационной массы виброплиты.

Анализ значений вынуждающего усилия НВП в зависимости от их массы (рисунок 1) показывает, что вынуждающее усилие P вибровозбудителя НВП примерно в 10 раз превышает её вес Q .

Это свидетельствует о том, что в процессе работы основание виброплиты периодически должно терять контакт с грунтом, а затем снова его восстанавливать, причем длительность

периода потери контакта с грунтом, скорость НВП в момент восстановления контакта и количество оборотов, совершаемых валом вибровозбудителя в процессе потери контакта (кратность колебаний) будут зависеть от массы верхней и нижней частей НВП, количества и характеристик связывающих их амортизаторов, частоты и вынуждающего усилия вибровозбудителя, прижимного усилия стрелы экскаватора и свойств грунта.

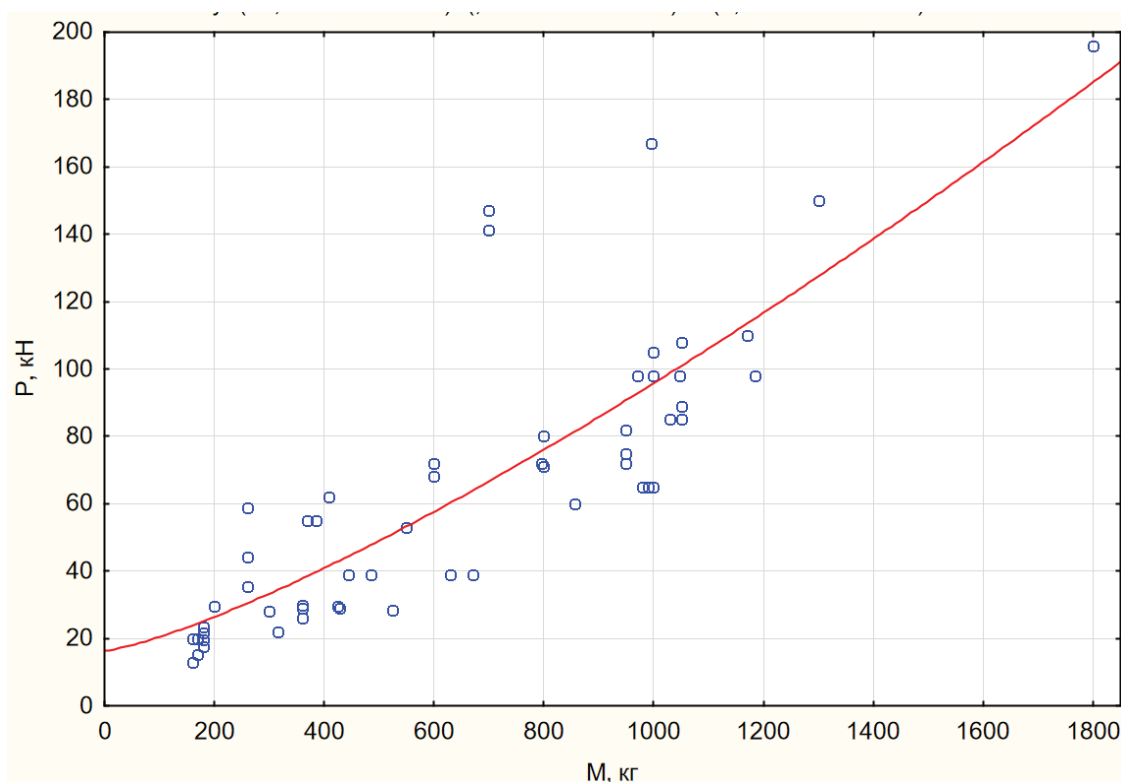


Рисунок 1 – Результаты обработки значений вынуждающего усилия для различных масс НВП

Figure 1 – Processing results of forcing force for different VPC masses

Если рассматривать не абсолютное, а относительное вынуждающее усилие, рассчитываемое как отношение вынуждающего усилия к весу НВП, то диапазон значений относительного вынуждающего усилия для НВП составляет в основном $P/Q = 6...18$ (рисунок 2) ($P/Q = 4...23$ по граничным точкам диапазона), что в среднем несколько меньше значений относительного вынуждающего усилия для самоходных виброплит $P/Q = 10...20$ [1] ($P/Q = 10...22$ по данным [2] и $P/Q = 16...24$ по данным [3]), но больше соответствующих значений для вибрационных катков $P/Q = 2...5,5$ [4].

Таким образом, режим работы НВП ближе к режиму работы самоходных виброплит, чем к вибрационным каткам. В то же время возможность дополнительного пригруза НВП стрелой экскаватора создает условия, препятствующие отрыву основания НВП от грунта. Это соз-

дает предпосылки для возможности применения известной [5, 6] классификации режимов работы вибрационных катков [постоянный контакт (continuous contact), частичный отрыв (partial uplift), двойной прыжок (double jump) и др.] и для НВП. Однако условия перехода НВП в различные режимы колебаний требуют дополнительных исследований. Вышеуказанные соображения позволяют сделать вывод о необходимости учета возможности работы НВП в отрывных режимах при разработке математической модели взаимодействия НВП с уплотняемым грунтом, в то время как многие исследователи рассматривают безотрывный режим¹⁰ [7, 8, 9, 10, 11].

Анализ частоты колебаний виброплит в зависимости от их массы (рисунок 3) характеризуется очень низким значением коэффициента детерминации $R^2 = 0,136$ (таблица).

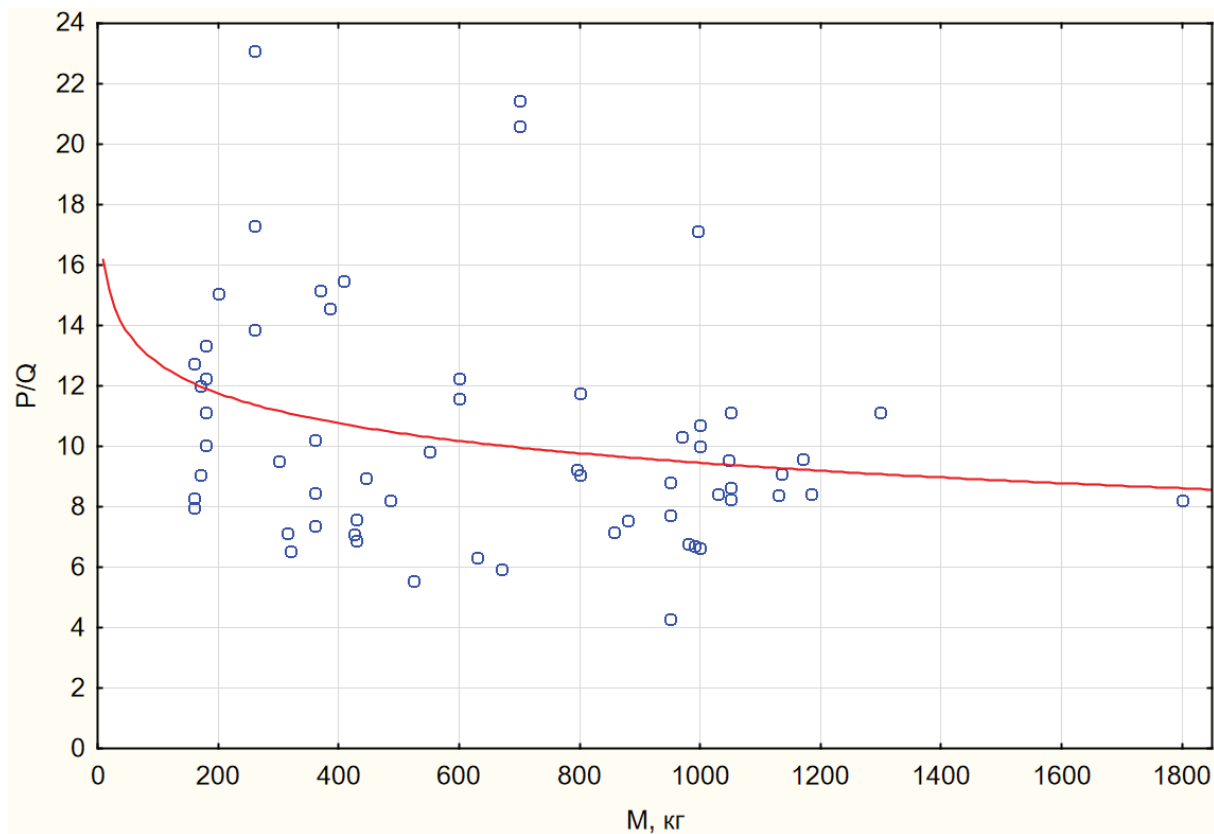


Рисунок 2 – Результаты обработки значений относительного вынуждающего усилия для различных масс НВП

Figure 2 – Processing results of the relative forcing force for different VPC masses

¹⁰ Дубков В.В., Базинская А.М. Модель уплотнения черного щебня вибрационным катком // Архитектура, строительство, транспорт : материалы Международной научно-практической конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»). Омск, 2015. С. 645–649.

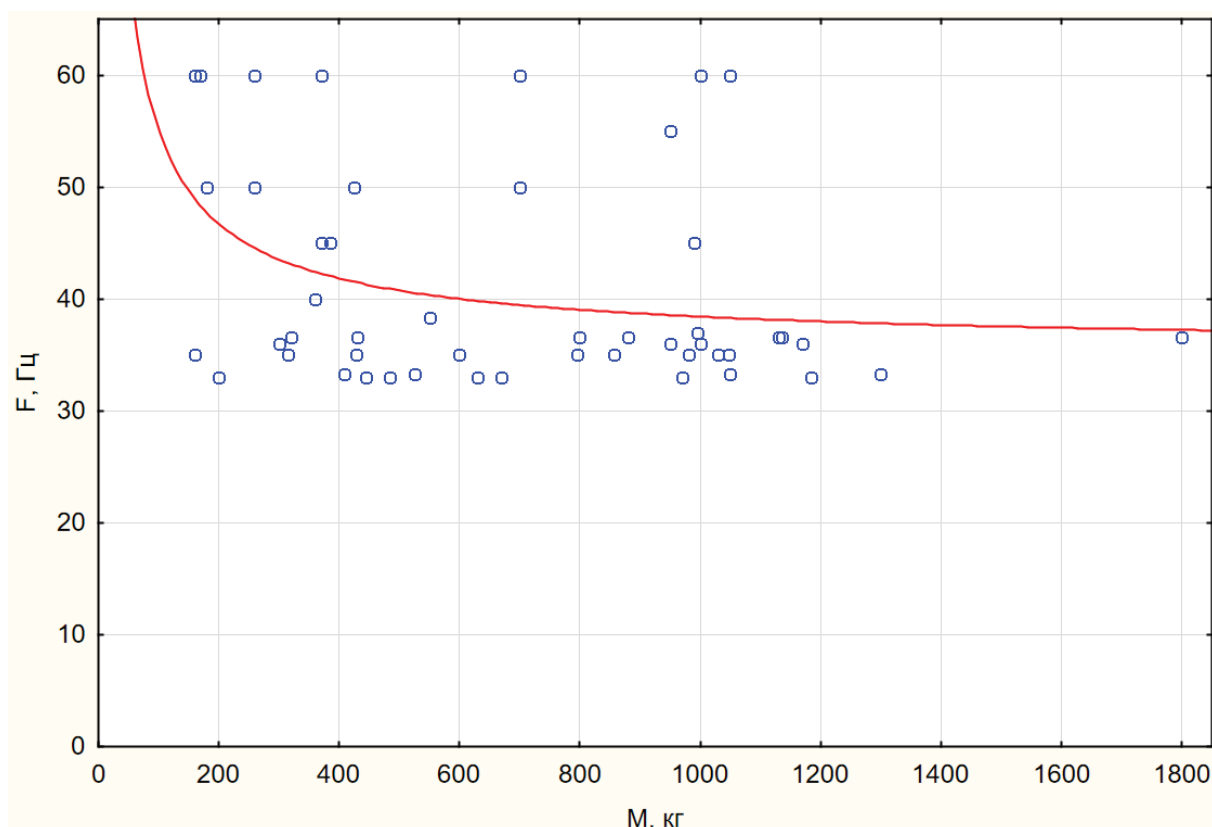


Рисунок 3 – Результаты обработки значений частоты колебаний НВП для различных масс НВП

Figure 3 – Processing results of the oscillation VPC frequency for different VPC masses

Частота колебаний, как и относительное вынуждающее усилие, является одним из главных технических характеристик НВП. Однако отсутствие как у отечественных, так и у зарубежных производителей методики оценки влияния технических характеристик НВП на результаты уплотнения грунта в конкретных технологических условиях не позволяет обосновать рациональные значения этих параметров, что отражается в низком значении коэффициента детерминации этих параметров от массы НВП. В то же время наблюдается некоторое предпочтение производителей НВП диапазону частот 30...40 Гц. При этом диапазон частот колебаний НВП находится несколько ниже диапазона частот колебаний самоходных виброплит (50...100 Гц) [1], но несколько выше диапазона частот колебаний вибрационных катков (25...40 Гц) [2]. Данные результаты также подтверждают позиционирование НВП по режимам работы между самоходными

виброплитами и вибрационными катками, что позволяет использовать для разработки математической модели уплотнения грунта при помощи НВП подходы, применяемые как для вибрационных катков [12], так и для самоходных виброплит [13].

Анализ длины основания НВП в зависимости от их массы (рисунок 4) осложняется тем, что производители не всегда указывают, что понимается под длиной основания – длина контактной поверхности основания или длина основания с открылками. В большинстве случаев под длиной основания НВП понимается длина основания с открылками. В целом зависимость длины основания НВП от массы характеризуется не очень высоким коэффициентом детерминации ($R^2=0,706$). Возможно, производители не пришли к единому мнению относительно обоснования длины основания НВП или считают этот параметр несущественным.

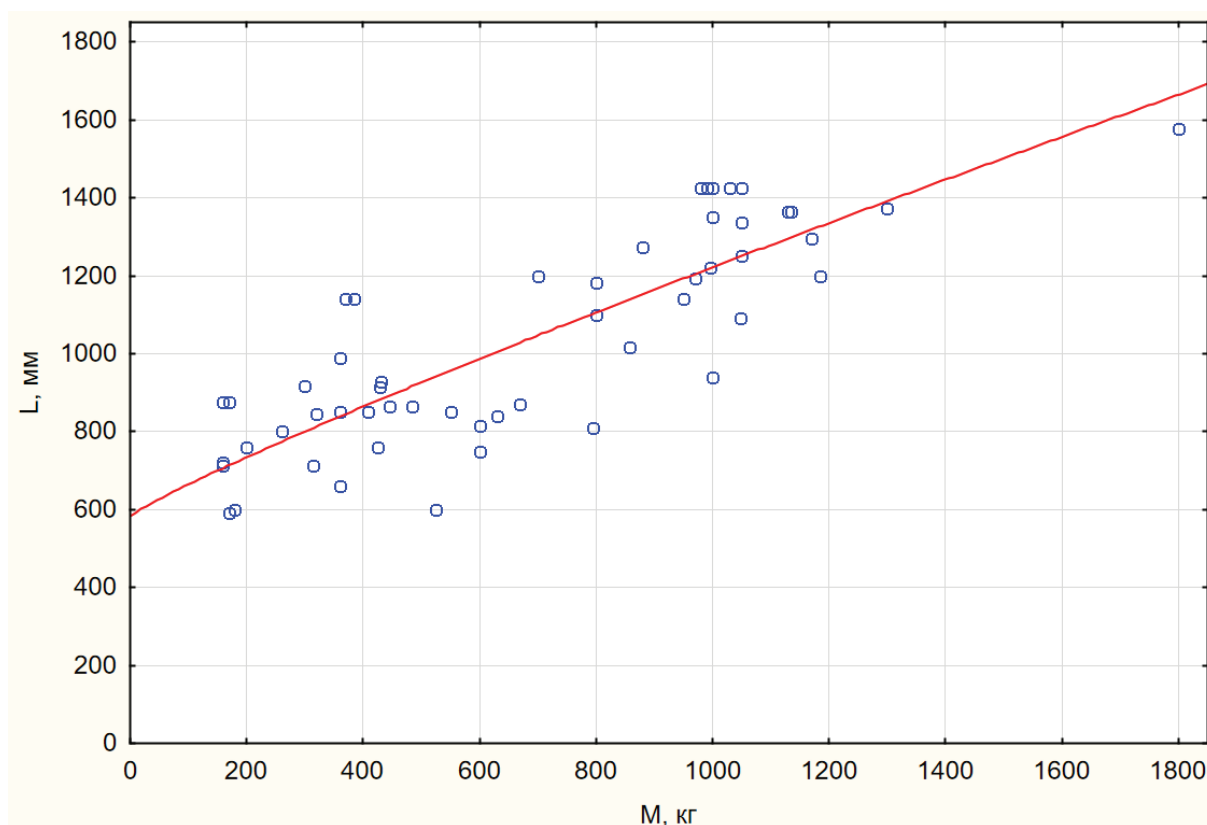


Рисунок 4 – Результаты обработки значений длины основания НВП для различных масс НВП

Figure 4 – Processing results of the base VPC length for different VPC masses

Несколько более тесная корреляция ($R^2 = 0,842$) наблюдается у зависимости ширины основания НВП от массы (рисунок 5), хотя разброс значений ширины при фиксированной массе НВП остается достаточно существенным. Ширина основания НВП является более значимым параметром по сравнению с длиной, поскольку влияет на глубину активной зоны при уплотнении¹¹.

При анализе зависимости массы экскаватора от массы НВП (рисунок 6) используется усредненное значение массы экскаватора, т.к. производителями указывается диапазон возможных масс экскаватора. При этом диапазон изменения массы относительно среднего значения может быть весьма существенным (отношение максимально возможной массы экскаватора к минимально возможной может достигать 4...5).

¹¹ Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М., 1975. 288 с.

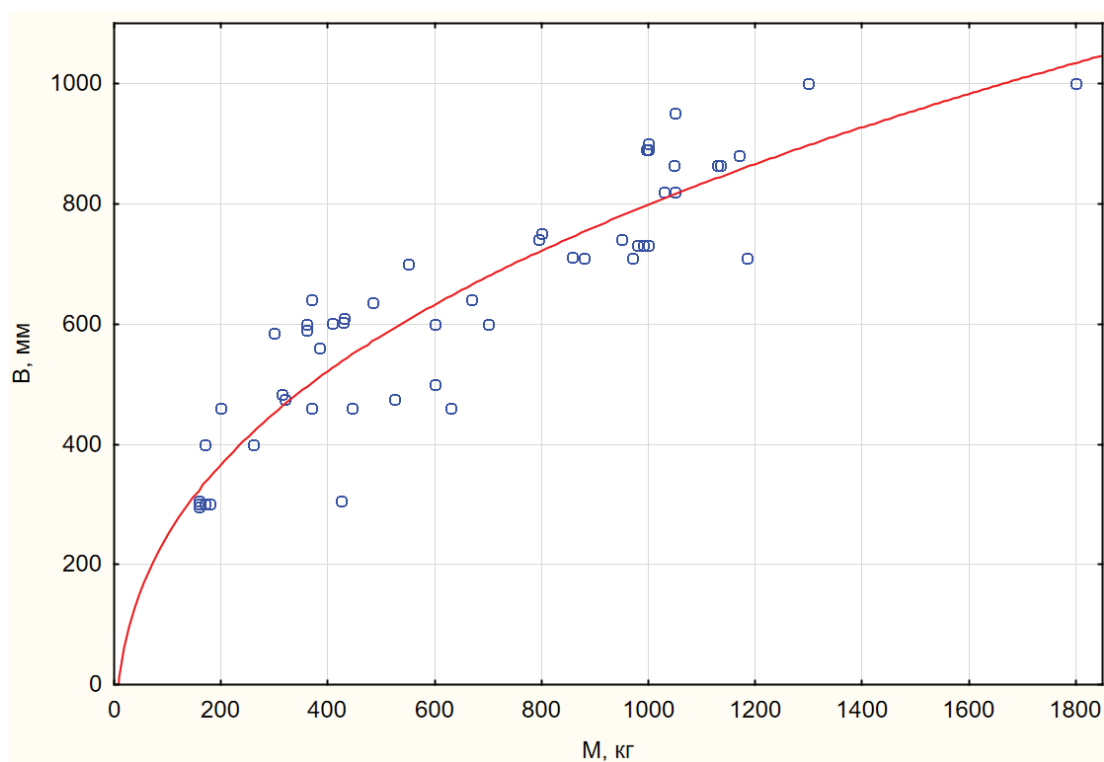


Рисунок 5 – Результаты обработки значений ширины основания НВП для различных масс НВП

Figure 5 – Processing results of the base VPC width for different VPC masses

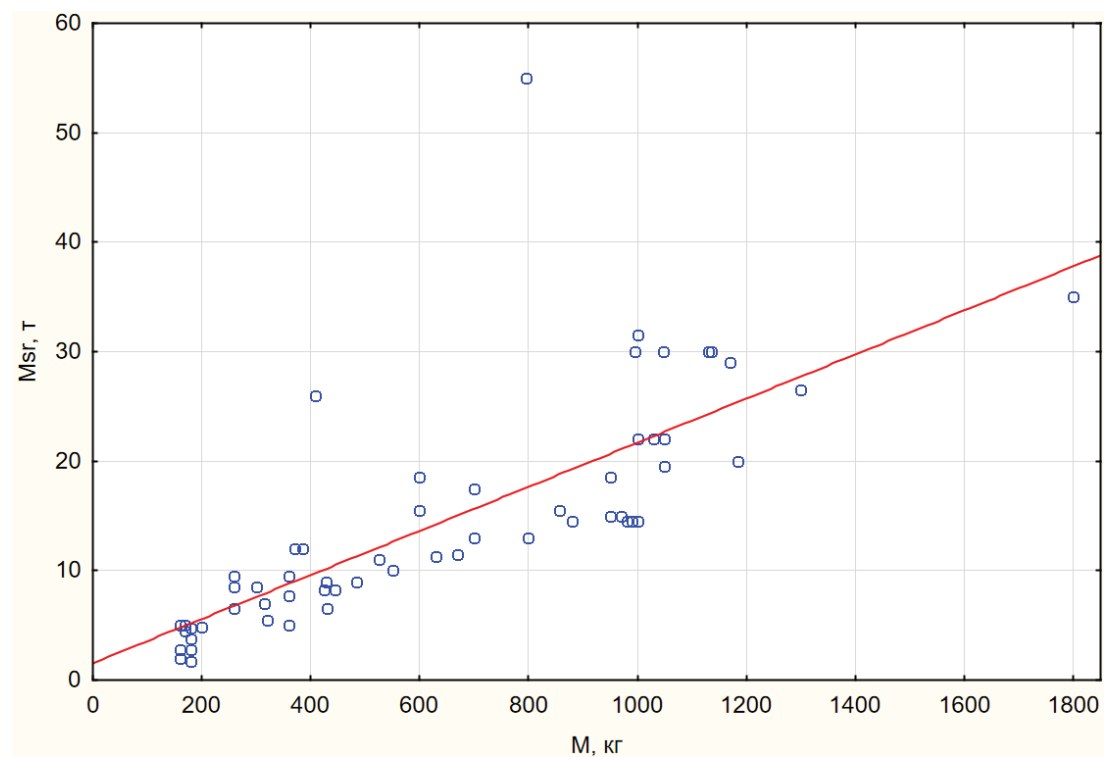


Рисунок 6 – Результаты обработки значений усредненной массы экскаватора для различных масс НВП

Figure 6 – Processing results of the average excavator weight for different VPC masses

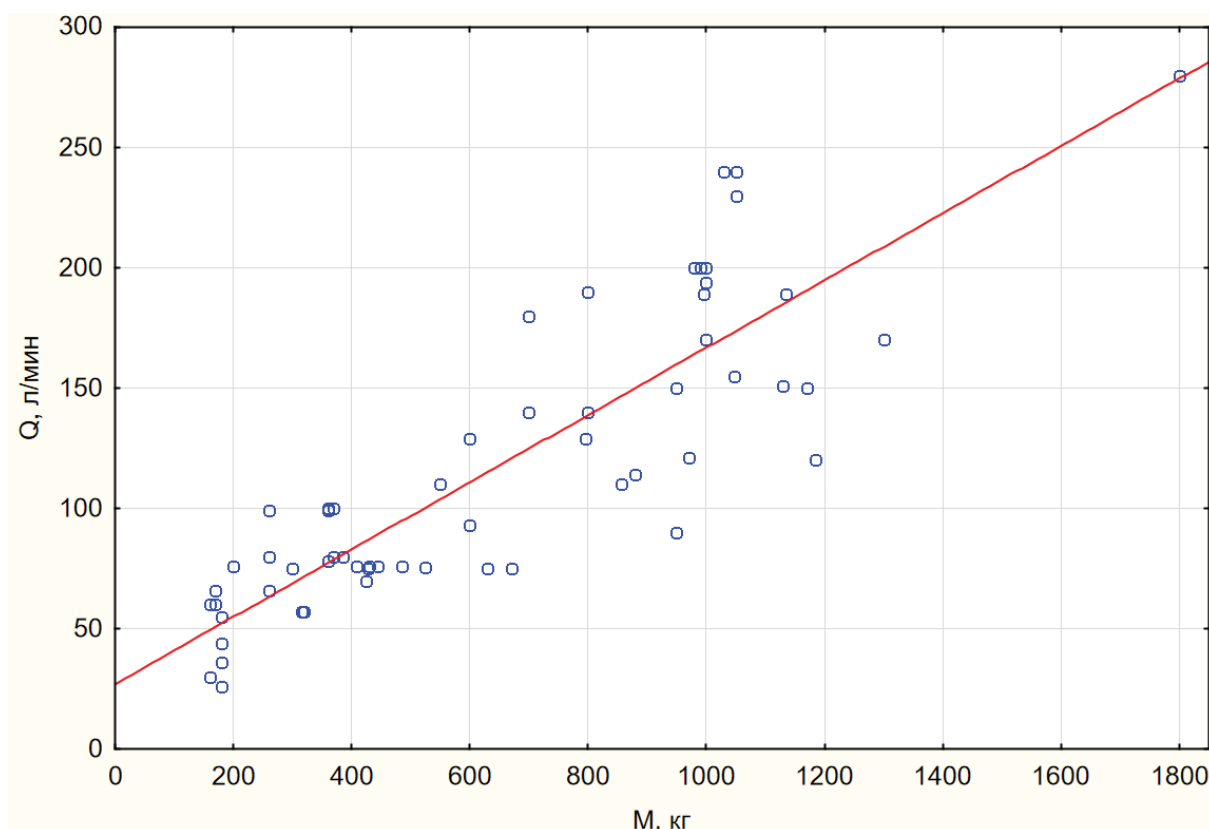


Рисунок 7 – Результаты обработки значений расхода масла НВП для различных масс НВП

Figure 7 – Processing results of the VPC oil consumption for different VPC masses

Несмотря на то, что частота колебаний НВП очень слабо коррелирует с их массой (см. рисунок 3), анализ зависимости требуемого расхода масла Q (рисунок 7) (обеспечивающего частоту колебаний НВП) от массы НВП характеризуется достаточно высоким значением коэффициента детерминации ($R^2 = 0,745$).

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного статистического анализа технических характеристик навесных экскаваторных виброплит установлено, что режим их работы занимает промежуточное положение между режимами работы вибрационных катков и самоходных виброплит. Относительные вынуждающие усилия НВП находятся в диапазоне, более близком к диапазону работы самоходных виброплит, а частоты колеба-

ний находятся в диапазоне, более близком к диапазону работы вибрационных катков.

Существенное превышение вынуждающего усилия НВП их веса (в среднем в 10 раз) приводит к периодическому отрыву основания НВП от грунта в процессе работы, несмотря на дополнительное прижимающее усилие со стороны стрелы экскаватора. Длительность потери контакта основания НВП с грунтом, а также скорость и ускорение основания НВП в момент восстановления контакта будут зависеть от характеристик НВП (массы верхней и нижней частей НВП, количества и характеристик связывающих их амортизаторов, частоты и вынуждающего усилия вибровозбудителя), прижимного усилия стрелы от экскаватора и свойств грунта. Это обстоятельство требует обязательного учета при разработке матема-

тической модели взаимодействия НВП с грунтом в процессе его уплотнения.

Полученные регрессионные зависимости вынуждающего усилия и частоты колебаний НВП, а также размеров основания НВП, массы экскаватора и требуемого расхода масла для работы НВП должны учитываться при разработке методики определения результатов уплотнения НВП грунта в конкретных технологических условиях, а также могут быть использованы производителями при проектировании и модернизации конструкций НВП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Статистический анализ технических характеристик вибрационных плит // Механизация строительства. 2014. № 11. С. 32–35.
2. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4 (43). С. 73–80.
3. Евсеев Е.Ю., Куприянов Р.В., Зубков А.Ф. Анализ применения вибрационных плит для ремонта дорожных покрытий нежесткого типа // Механизация строительства. 2011. № 6 (804). С. 28–31.
4. Тюремнов И. С., Игнатьев А. А., Филатов И. С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник ТОГУ. 2014. № 3(34). С. 81–88.
5. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) // Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, Athens, Greece. 2004. P. 97–106.
6. Тюремнов И.С. Обзор систем непрерывного контроля уплотнения грунта для вибрационных катков. Часть 3. Особенности функционирования и «интеллектуальное уплотнение» // Вестник ТОГУ. 2016. № 2(41). С. 115–122.
7. Михеев В.В., Савельев С.В. Математическая модель уплотнения упруго-вязко-пластичной грунтовой среды при взаимодействии с рабочим органом дорожной машины в рамках модифицированного подхода сосредоточенных параметров [Электронный ресурс] // Вестник СибАДИ. 2017. №2(54). С. 28–36. Режим доступа: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36)
8. Евсеев Е.Ю., Матвеев В.Н., Зубков А.Ф. Моделирование процесса взаимодействия вибрационной плиты с горячей асфальтобетонной смесью при ремонте дорожных по-

крытий// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. № 4 (28). С. 70–77.

9. Савельев С.В., Милюшенко С.А., Лашко А.Г. Модель взаимодействия рабочего органа вибрационного катка с уплотняемой средой // Механизация строительства. 2013. № 1 (823). С. 24–28.

10. Корчагина Е.А., Щербаков В.С. Моделирование динамической системы «возмущающие воздействия – каток – оператор» [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/matematicheskaya-model-dinamicheskoy-sistemy-opornaya-poverhnost-katok-operator>.

11. Носов С.В. Технологические режимы работы уплотняющих машин и закономерности уплотнения дорожно-строительных материалов на основе развития их реологии// Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2011. № 3 (23). С. 87–98.

12. Тюремнов И.С., Игнатьев А.А. Уплотнение грунтов вибрационными катками: монография. Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2012. 140 с.

13. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами: монография. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. 143 с. 1 электрон. опт. диск.

REFERENCES

1. Tyuremnov I.S., Novichihin A.A. Statisticheskij analiz tehnikeskikh harakteristik vibracionnyh plit [Statistical analysis of the technical characteristics of vibrating plates]. *Mehanizacija stroitel'stva*, 2014; 11: 32–35 (in Russian).
2. Musijako D.V., Rasulov R.A. Samohodnaja vibracionnaja plita s val'cem [Self-propelled vibrating plate with a roller]. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016; 4(43): 73–80 (in Russian).
3. Evseev E.Ju., Kuprijanov R.V., Zubkov A.F. Analiz primenenija vibracionnyh plit dlja remonta dorozhnyh pokrytij nezhestkogo tipa [Analysis of the vibrating plates use for repairing pavements of non-rigid type]. *Mehanizacija stroitel'stva*, 2011; 6(804): 28–31 (in Russian).
4. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statisticheskij analiz tehnikeskikh harakteristik gruntovyh vibracionnyh katkov [Statistical analysis of the technical characteristics of ground vibrating rollers]. *Vestnik TOGU*, 2014; 3(34): 81–88.

5. Adam D., Kopf F. Operational Devices for Compaction Optimization and Quality Control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device) *Proceedings of the International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction*, Athens, Greece. 2004; 97–106.

6. Tyuremnov I.S. Obzor sistem nepre-ryvnogo kontrolja uplotnenija grunta dlja vibra-cionnyh katkov. Part 3. Osobennosti funkcioniro-vanija i «intelektual'noe uplotnenie» [Overview of continuous soil compaction monitoring systems for vibrating rollers. Part 3. Features of the operation and “intelligent seal”]. *Vestnik TOGU*, 2016; 2(41): 115–122 (in Russian).

7. Miheev V.V., Savel'ev S.V. Matematicheskaja model' uplotnenija uprugovjaskoplas-tichnoj gruntovoj sredy pri vzaimodejstvii s rab-ochim organom dorozhnoj mashiny v ramkah modifitsirovannogo podhoda sosredotochennyh parametrov [Mathematical model of compaction of an elastoviscoplastic soil environment when interacting with a working body of a road machine within the framework of a modified approach of lumped parameters]. *Vestnik SibADI*, 2017; 2(54): 28–36 (in Russian). Available at: [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2\(54\)-28-36](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2017-2(54)-28-36) (accessed: 08.02.2018)

8. Evseev E.Ju., Matveev V.N., Zubkov A.F. Modelirovanie processa vzaimodejstvija vibra-cionnoj plity s gorjachej asfal'tobetonnoj smes'ju pri remonte dorozhnyh pokrytij [Modeling the process of interaction of a vibrating plate with a hot mix asphalt during road pavement repair]. *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo ar-hitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2012; 4(28): 70–77 (in Russian).

9. Savel'ev S.V., Miljushenko S.A., Lashko A.G. Bezotryvnye kolebanija. Model' vzaimodejstvija rabocheho organa vibracionnogo katka s uplotnjaemoj sredoj [Model of the interaction of the working body and the vibrating roller with compacted medium]. *Mehanizacija stroitel'stva*, 2013; 1(823): 24–28 (in Russian).

10. Korchagina E.A., Shherbakov V.S. Bezotryvnye kolebanija. Modelirovanie dinami-cheskoj sistemy “vozmushhajushhie vozdeystvi-ja - katok - operator” [Simulation of the dynamic system “disturbing influences – roller - operator”]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/matematicheskaya-model-dinamicheskoy-siste-my-opornaya-poverhnost-katok-operator> (ac-cessed: 08.02.2018) (in Russian).

11. Nosov S.V. Bezotryvnye kolebanija. Teh-nologicheskie rezhimy raboty uplotnjajushhih mashin i zakonmernosti uplotnenija dorozh-no-stroitel'nyh materialov na osnove razvitiija

ih reologii [Technological modes of the com-pacting machines operation and patterns of the road-building materials compaction based on the development of their rheology]. *Nauchnyj vest-nik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitek-turno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura*, 2011; 3(23): 87–98 (in Russian).

12. Tyuremnov I.S., Ignat'ev A.A. Uplotnenie gruntov vibracionnymi katkami [Soil compaction using vibrating rollers]. *Monografija. Jaroslavl'*, izd-vo JAGTU, 2012; 140 p. (in Russian).

13. Tyuremnov I. S., Novichihin A.A. Uplot-nenie gruntov vibracionnymi plitami. *Monografija* [Soil compaction using vibrating plates]. Jaroslavl', izd-vo JAGTU, 2018; 143 p. (in Russian).

Поступила 01.03.2019, принята к публи-кации 12.04.2019.

Авторы прочитали и одобрили оконча-тельный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятель-ности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Конфликт ин-тересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тюремнов Иван Сергеевич (г. Ярославль, Россия) – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Строительные и дорожные маши-ны» ФГБОУ ВО «Ярославский государствен-ный технический университет», ORCID 0000-0003-2261-4153 (150023, г.Ярославль, Московский пр-т, 88, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru).

Федорова Дарья Владимировна (г. Ярос-лавль, Россия) – старший преподаватель кафедры «Начертательная геометрия и ин-женерная графика» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический универси-тет», ORCID 0000-0001-7885-3159 (150023, г. Ярославль, Московский пр-т, 88, e-mail: darij30@rambler.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan S. Tyuremnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Road and Construction Machinery Department, Yaroslavl State Technical University, ORCID 0000-0003-2261-4153 (150023, Yaroslavl, Russia, 88 Moskovsky Ave., e-mail: tyuremnovis@yandex.ru).

Darya V. Fedorova – Senior Lecturer of the Descriptive Geometry and Engineering Graph-ics Department, Yaroslavl State Technical Uni-versity, ORCID 0000-0001-7885-3159 (150023, Yaroslavl, Russia, 88 Moskovsky Ave., e-mail: darij30@rambler.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Тюремнов Иван Сергеевич – общее руководство работой, написание текста статьи.

Федорова Дарья Владимировна – подготовка исходных данных и статистическая обработка результатов.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Tyuremnov Ivan Sergeyevich – general management and paper writing.

Fedorova Darya Vladimirovna – preparation of basic data and statistical processing of results.