

УДК (УДК) 625.76.08

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ САМОХОДНОСТИ ВИБРОПЛИТ

ANALYSIS OF WAYS TO ENSURE SELF-PROPELLATION OF VIBRATORY PLATE COMPACTORS

Афанасьев М.А., Тюрёмнов И.С.

Afanasev M.A., Tyuremnov I.S.

Ярославский государственный технический университет (Ярославль, Россия)

Yaroslavl State Technical University (Yaroslavl, Russia)

Аннотация. Самоходные виброплиты – это грунтоуплотняющие машины поверхностного действия, имеющие плоский рабочий орган, который приводится в состояние колебательного движения с помощью вибровозбудителя. Наиболее эффективным способом обеспечения самоходности виброплит является использование энергии колебательного движения самой виброплиты. В последние десятилетия промышленно выпускаются различные варианты конструкций самоходных виброплит, однако существующие исследования затрагивают только две группы виброплит – неререверсивные виброплиты с одновальным вибровозбудителем круговых колебаний и ререверсивные виброплиты с двухвальным вибровозбудителем направленных колебаний. Вместе с тем, увеличение количества дебалансов и/или изменение их расположения друг относительно друга позволяет решать более сложные задачи управления виброплитой, а именно, реализация дистанционного управления, движения в стороны или по дуге, движения вдоль уклона и т.д. Целью исследования являлся сбор и анализ данных о промышленно выпускаемых моделях самоходных виброплит. Установлено, что наибольшее распространение получили неререверсивные виброплиты с одновальным возбудителем круговых колебаний и ререверсивные виброплиты с двухвальным возбудителем круговых колебаний. В то же время, основными тенденциями последних десятилетий являются увеличение количества дебалансных валов и внедрение конструкций, обеспечивающих дистанционное управление виброплитой. Увеличение количества дебалансных валов также позволяет добиться более высоких значений вынуждающей силы.

Ключевые слова: уплотнение грунта, виброплита неререверсивная, виброплита ререверсивная.

Дата получения статьи: 24.09.2024
Дата принятия к публикации: 25.02.2025
Дата публикации: 25.09.2025

Сведения об авторах:

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,



Abstract. Self-propelled plate compactors are surface-action soil compaction machines with a flat working device set in a state of oscillatory motion by means of a vibration exciter. The most effective way to ensure self-propelled plate compactors is to use the energy of the vibrational motion of the vibratory plate itself. In recent decades, various designs of self-propelled plate compactors have been industrially produced, but existing studies cover only two groups of plate compactors: forward plate compactors with a single-shaft vibration exciter of circular oscillations and reversible plate compactors with a two-shaft vibration exciter of directional oscillations. At the same time, an increase in the number of unbalances and/or a change in their location relative to each other makes it possible to solve more complex problems of vibratory plate control, namely, the implementation of remote control, movement to the sides or along an arc, movement along a slope, etc. The aim of the study was to collect and analyze data on industrially produced models of self-propelled vibratory plates. It was found that the most widely used are forward plate compactors with a single-shaft exciter of circular oscillations and reversible plate compactors with a two-shaft exciter of circular oscillations. At the same time, the main trends of recent decades are an increase in the number of unbalance shafts and the introduction of designs that provide remote control of the vibratory plate. An increase in the number of unbalance shafts also allows achieving higher values of the driving force.

Keywords: soil compaction, vibration, forward plate compactor, reversible plate compactor.

Date of manuscript reception: 24.09.2024
Date of acceptance for publication: 25.02.2025
Date of publication: 25.09.2025

Authors' information:

Mikhail A. Afanasev – postgraduate student, assistant of the Construction and road machines department at Yaroslavl State Technical University, afanasiev.m.a2016@yandex.ru

e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5059-2557>

Тюремнов Иван Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5059-2557>

Ivan S. Tyuremnov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Construction and road machines department of Yaroslavl State Technical University, e-mail: tyuremnovis@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2261-4153>

1. Введение

Уплотнение грунта – технологический процесс, направленный на увеличение плотности и прочности земляных сооружений и оснований путем снижения их пористости. Уплотнение грунта может выполняться с использованием различных типов грунтоуплотняющих машин, к которым относятся грунтовые катки, трамбуемые машины, вибро-трамбовки, самоходные и навесные виброплиты, траншейные виброкатки и т.д. Выбор грунтоуплотняющих машин осуществляется, главным образом, исходя из условий проведения работ.

Самоходные виброплиты – это грунтоуплотняющие машины поверхностного действия, имеющие плоский рабочий орган, который приводится в состояние колебательного движения с помощью вибровозбудителя. Для подавляющего большинства современных моделей виброплит характерен отрывной характер взаимодействия рабочего органа с грунтом.

В отличие от других типов вибрационных грунтоуплотняющих машин (виброкатки, навесные виброплиты), в самоходных виброплитах энергия колебательных движений рабочего органа используется не только для увеличения контактных напряжений на поверхности грунта, но и для передвижения самой машины. Таким образом, обеспечение самоходного передвижения и возможности маневрирования являются важными задачами при проектировании данного типа грунтоуплотняющих машин.

Самоходные виброплиты классифицируют по следующим признакам [1]:

- масса: сверхлегкие (до 100 кг), легкие (100-200 кг), средние (200-500 кг) и тяжелые (свыше 500 кг);
- способ передвижения: нереверсивные и реверсивные;

- способ управления: ручное и дистанционное;
- тип двигателя: бензиновый, дизельный и электрический;
- форма основания: прямоугольное, круглое;
- тип трансмиссии: механическая, гидравлическая.

Самоходные виброплиты используются преимущественно для работы на ровной горизонтальной поверхности. Допустимый угол наклона поверхности ограничивается допустимым углом наклона применяемого двигателя (при использовании двигателя внутреннего сгорания), способностью виброплиты преодолевать уклон, а также ее устойчивостью к опрокидыванию. Для большинства существующих виброплит допустимый угол уклона уплотняемой поверхности составляет от 10 до 20 град.

Ввиду того, что виброплиты применяются на предварительно подготовленных участках без существенных неровностей, удобно рассматривать движение виброплиты в проекции на плоскость грунта. В этом случае, для определения положения виброплиты в любой момент времени достаточно задать координаты X и Y , а также угол поворота φ .

Наличие уклона поверхности приводит к появлению в рассматриваемой плоскости продольной и (или) поперечной составляющей силы тяжести, что негативно сказывается на работе виброплиты. При движении вниз по склону возникает продольная составляющая силы тяжести, сонаправленная с движением виброплиты. В результате, скорость виброплиты увеличивается, что приводит к снижению количества циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход. Вследствие этого, для достижения требуемого коэффициента уплотнения тре-

буется большее количество проходов по одному следу.

При движении вверх по склону, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход увеличивается, что снижает производительность и приводит к увеличению призмы волочения, из-за чего дополнительно повышается сопротивление передвижению (это связано с тем, что призма волочения создает дополнительный преодолеваемый уклон). При дальнейшем увеличении угла наклона, движущая сила вибровозбудителя уравнивается силами сопротивления перемещению, и дальнейшее движение становится невозможным.

При движении поперек уклона (рис. 1) в плоскости XU возникает поперечная составляющая силы тяжести F_y^T . Для ее компенсации требуется сообщить виброплите силу, равную по величине и противоположную по направлению поперечной составляющей силы тяжести F_y^T . В отсутствие у большинства моделей виброплит возможности генерации поперечных движущих сил, поперечная составляющая силы тяжести может быть скомпенсирована поворотом виброплиты в плоскости XU на некоторый угол φ , который зависит от угла наклона поверхности, массы виброплиты, величины вынуждающей силы, а также типа виброплиты (поскольку характер взаимодействия реверсивных и неревверсивных плит с грунтом несколько различается). В результате, поперечная составляющая силы тяжести F_y^T будет скомпенсирована проекцией F_y^B движущей силы F^B на ось Y . Однако, при повороте виброплиты, основание также окажется развернуто относительно направления движения виброплиты. В результате, количество циклов приложения нагрузки к одной точке грунта за один проход будет распределяться по ширине следа неравномерно, что негативно скажется на результате уплотнения грунта.

Стоит отметить, что поскольку у большинства моделей виброплит длина основания равна или превышает его ширину движение вдоль склона (вверх или вниз) предпочтительно, так как это снижает риск опрокидывания. Однако из условия обеспечения равномерной скорости движения виб-

роплиты от прохода к проходу, желательно движение виброплиты именно поперек уклона, но без увода ее в сторону.

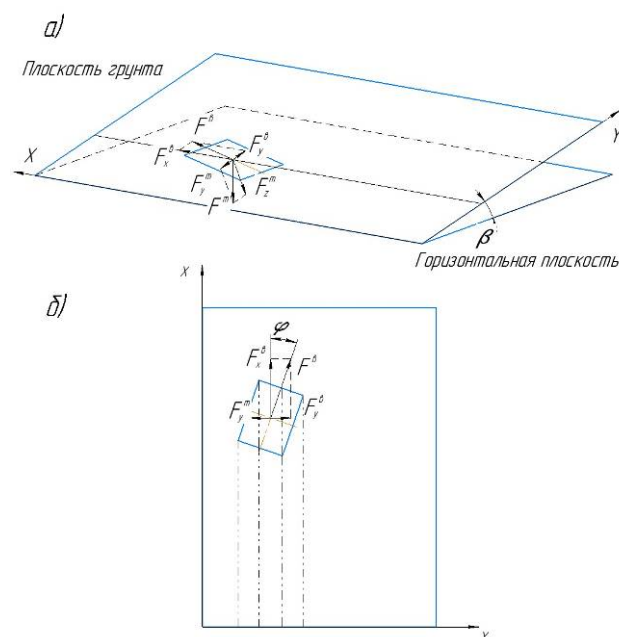


Рис. 1. Движение виброплиты поперек уклона: а – геометрия участка выполнения работ; б – увод виброплиты в сторону под действием силы тяжести

Существующие исследования по теме виброплит направлены на повышение вибрационной защиты органов управления [2], оценку влияния вибрации на близлежащие сооружения и подземные коммуникации [3-5], повышение производительности виброплит [6-7], совершенствование методик моделирования [8-9] и проектирования виброплит [10-11] и др. Важным направлением развития грунтоуплотняющих машин в целом является внедрение систем «интеллектуального уплотнения» [12-13].

Существует ряд исследований, в которых описываются конструкции и условия обеспечения самоходности виброплит [14-17]. Однако все эти исследования сосредоточены на двух наиболее распространенных типах виброплит – неревверсивных с одновальным возбудителем круговых колебаний и реверсивных с двухвальным вибровозбудителем направленных колебаний. Вместе с тем, в последние десятилетия появился целый ряд конструкций виброплит, которые до сих пор не были подробно освещены в научной ли-

температуре. В частности, это виброплиты с дистанционным управлением, которые используют энергию колебаний не только для прямолинейного движения (в том числе реверсивного), но и для изменения направления движения (поворот, движение по дуге, боковое движение), т.е. маневрирования.

Целью данного исследования являлся сбор и систематизация данных о существующих и перспективных конструкциях виброплит, способов обеспечения их самоходного передвижения и маневрирования. На основе собранных данных проведен анализ основных тенденций в области производства виброплит, а также предложены направления дальнейшего совершенствования конструкций данного типа грунтоуплотняющих машин.

2. Материалы и методы

В ходе исследования были проанализированы конструкции и технические характеристики 1137 моделей виброплит основных отечественных марок (Красный маяк, Вибромаш, Техком, Сплитстоун и др.) и зарубежных марок (BOMAG, Mikasa, ALTECO, AMMANN, Belle, Helmut, Husqvarna, Diam, Batmatic, Dynapac, Euro Shatal, Foxweld и др.). Всего рассмотрено 67 торговых марок виброплит, произведенных в России, Белоруссии, КНР, Японии, Южной Корее, Чехии, Швейцарии, Германии, Израиле, США, Франции, Великобритании, Испании, Италии и Швеции.

Анализ выполнен на основе данных, предоставленных на официальных сайтах производителей виброплит, а также на сайтах их дилеров. Кроме того, были рассмотрены патенты и научные исследования, касающиеся вопросов обеспечения самоходности и маневренности виброплит.

3. Результаты

Самоходность вибрационных машин (и виброплит в частности) достигается, главным образом, за счет наличия того или иного вида асимметрии системы. Известны конструкции виброплит, в которых асиммет-

рия достигается за счет приложения к виброплите внешней силы. В работе [18] рассматривается испытательная установка для оценки влияния скорости передвижения виброплиты на результат уплотнения грунта, где передвижение виброплиты осуществляется при помощи лебедки. Однако, на практике виброплиты с лебедочным приводом не нашли широкого применения.

Наиболее эффективный способ обеспечения самоходности виброплит - использование энергии колебательного движения самой виброплиты. Для этого могут применяться вибровозбудители ненаправленного или направленного действия. Цикл передвижения виброплиты с вибровозбудителем ненаправленного действия приведен на рис. 2. Здесь F_d – движущая сила виброплиты в обратном направлении; F_p – сила реакции грунта, ограничивающая движение виброплиты в обратном направлении; F_m и F_p – вес рамы и сила реакции грунта, ограничивающие амплитуду опорной плиты в вертикальной плоскости; P – вынуждающая сила.

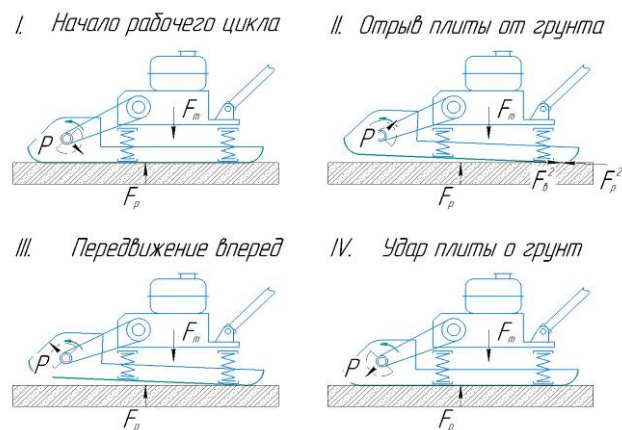


Рис. 2. Цикл передвижения нереверсивной виброплиты

Упрощенно цикл передвижения нереверсивной виброплиты можно представить состоящим из 4 этапов:

1. В первую четверть оборота дебалансного вала (рис. 2) виброплита прижимается к поверхности уплотняемого грунта под действием вертикальной составляющей вынуждающей силы, за счет чего сопротивление перемещению на данном этапе максимально. Поэтому, несмотря на наличие гори-

зонтальной составляющей вынуждающей силы, виброплита остается на месте.

2. В течение второй четверти оборота опорная плита начинает отрываться от грунта. На этом этапе также присутствует горизонтальная составляющая вынуждающей силы, направленная противоположно движению виброплиты. Однако, поскольку вибровозбудитель смещен вперед относительно центра масс виброплиты, задняя кромка сохраняет контакт с грунтом и выступает в качестве мгновенной оси вращения. В результате виброплита «упирается» в грунт задней кромкой, и сила реакции грунта частично компенсирует горизонтальную составляющую вынуждающей силы, ограничивая движение плиты в обратном направлении.

3. В третьей четверти оборота направление горизонтальной составляющей вынуждающей силы совпадает с направлением движения виброплиты. Поскольку передняя кромка опорной плиты к этому времени оторвана от поверхности грунта сопротивление перемещению в прямом направлении минимально и виброплита движется вперед.

4. На четвертом этапе происходит удар опорной плиты о грунт, что обеспечивает его уплотнение.

Принцип передвижения реальной виброплиты несколько сложнее, поскольку на современных виброплитах наблюдаются довольно высокие значения относительной вынуждающей силы и частоты колебаний вибровозбудителя [19]. В результате за один цикл отрыва опорной плиты от грунта дебалансный вал может совершать 2, 3 и более оборота.

Движение опорной плиты в вертикальной плоскости ограничено снизу – поверхностью грунта, сверху – массой рамы с двигателем. Жесткость демпфера, связывающего верхнюю и нижнюю массу, обычно выбирается таким образом, чтобы при рабочей частоте колебаний вибровозбудителя отсутствовал резонанс.

Исследования [20] показывают, что самоходность виброплит, оснащенных одновальным возбудителем круговых колебаний, может достигаться и при расположении вибро-

возбудителя вблизи центра тяжести виброплиты. Для этого валу вибровозбудителя требуется задать обратное направление вращения (то есть такое, при котором в нижней точке своего вращения дебаланс будет двигаться противоположно направлению движения виброплиты), в результате чего основание виброплиты также будет стремиться занять наклонное положение, при котором обеспечиваются условия для самоходного передвижения виброплиты (а именно, разница в сопротивлении передвижению в прямом и обратном направлении). Тем не менее, подобные конструкции не нашли широкого применения в промышленно выпускаемых виброплитах.

Известен вариант конструкции виброплиты, в котором круговые колебания одновального вибровозбудителя ненаправленного действия преобразуются в направленные колебания [21]. Для этого вибровозбудитель устанавливается на опорную плиту с использованием передающего устройства, которое имеет различную жесткость в различных направлениях движения (рис. 3, а). Это позволяет улучшить ходовые качества виброплиты с использованием более дешевого одновального вибровозбудителя. Однако, насколько удалось установить, такая конструкция не нашла применения на практике.

Более широкие возможности для управления виброплитой достигаются при использовании двухвального вибровозбудителя направленных колебаний. В частности, появляется возможность реверсирования направления движения виброплиты, а также изменения ее скорости.

Наиболее ранние известные модели виброплит с вибрационным способом передвижения оснащались двухвальным вибровозбудителем направленных колебаний, установленным в центральной части опорной плиты посредством поворотного шарнира [20]. Использование шарнира позволяет передавать колебания, возникающие при вращении эксцентриков, на опорную плиту. При этом, при повороте блока дебалансов появляется возможность изменения направления равнодействующей вынуждающей силы, что обеспечивает условия для самоход-

ного передвижения виброплиты с возможностью реверса хода (рис. 3, б).

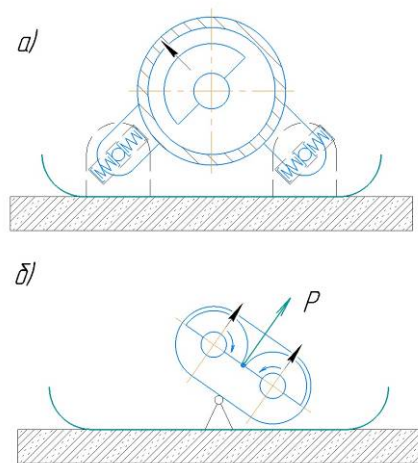


Рис. 3. Конструкция виброплиты:

а - виброплита с одновальным вибровозбудителем направленного действия; б - виброплита с двухвальным возбудителем направленного действия, установленным на поворотном шарнире

Данная конструкция имеет очевидные недостатки, такие как неиспользуемое пространство, необходимое для поворота блока дебалансов, а также сложность в передаче крутящего момента от двигателя на дебалансный вал (поскольку межосевое расстояние между валом двигателя и дебалансным валом изменяется при повороте блока дебалансов). Поэтому в настоящее время такая конструкция не встречается в промышленно выпускаемых виброплитах.

В современных реверсивных виброплитах, оснащенных двухвальным вибровозбудителем, реверсирование обеспечивается путем смещения фаз колебаний дебалансов друг относительно друга (рис. 4, а). Как правило, начальный угол сдвига фаз составляет 60...90 град при прямом и 240...270 град при реверсивном движении. В результате, вектор суммарной вынуждающей силы всего вибровозбудителя находится в пределах $\pm 30...45$ град относительно нормали к основанию виброплиты. Горизонтальная составляющая этого вектора обеспечивает самоходное передвижение виброплиты.

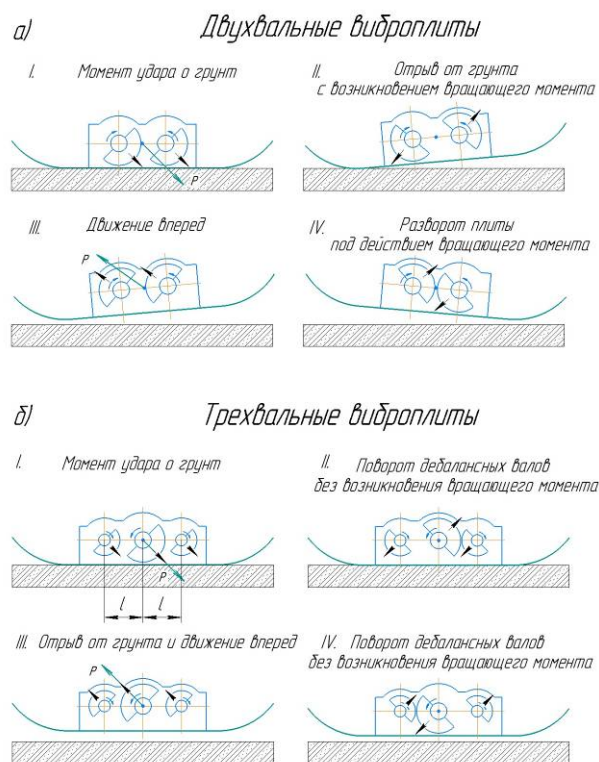


Рис. 4. Особенности передвижения реверсивных виброплит: а – двухвальные виброплиты; б – трехвальные виброплиты (Р – вынуждающая сила вибровозбудителя; l – расстояние между дебалансными валами)

Более совершенная конструкция реверсивной виброплиты разработана компанией AMMANN. В данном случае вместо двух дебалансов с соотношением статических моментов $\frac{1}{2} : \frac{1}{2}$ используется 3 дебаланса с соотношением статических моментов в пропорции $\frac{1}{4} : \frac{1}{2} : \frac{1}{4}$ (рис. 4, б). В отличие от двухвального вибровозбудителя, который помимо вынуждающей силы сообщает виброплите вращающий момент, приводящий к ее раскачиванию, трехвальный вибровозбудитель обеспечивает плоскопараллельное движения основания виброплиты и более равномерное распределение контактных напряжений по поверхности грунта (рис. 4).

Следующей задачей обеспечения самоходности виброплит является их маневрирование, то есть изменение углового положения виброплиты в горизонтальной плоскости (рис. 1). Способ маневрирования зависит от того, имеет ли виброплита ручное или дистанционное управление.

В случае с ручным управлением, поворот виброплиты осуществляется оператором путем приложения к рукоятки поперечной силы, которая создает вращающий момент относительно центра масс системы. На большинстве моделей виброплит рукоятка обладает значительной длиной и вынесена в заднюю часть, что обеспечивает поворот виброплиты при меньших значениях прикладываемой к рукоятки силы. На виброплитах с круглым основанием рукоятка располагается прямо над основанием и повторяет его контур, что обеспечивает более предсказуемое управление угловым положением виброплиты при работе вблизи различных препятствий.

При использовании систем дистанционного управления, поворот виброплиты осуществляется за счет вращающего момента, создаваемого вибровозбудителем. Существует несколько способов генерации данного вращающего момента.

Наибольшее распространение получила конструкция с использованием двухвального вибровозбудителя (подобная конструкция используется на виброплитах Wacker Neuson DPU110r). В этом случае один из валов является основным и содержит 1 дебаланс со статическим моментом, равным $\frac{1}{2}$ от суммарного статического момента вибровозбудителя $M_{\text{сум}}$. Второй вал является управляющим и содержит 2 дебаланса, смещенных относительно продольной оси виброплиты, со статическими моментами, равными $0,5M_{\text{сум}}$. Основной и управляющий валы вращаются в противоположные стороны, что позволяет задавать прямое или реверсивное движение путем одновременного смещения фаз колебаний дебалансов управляющего вала относительно фазы колебаний основного вала (рис. 5, а). Для поворота дебалансы управляющего вала смещаются как относительно основного вала, так и друг относительно друга, что приводит к появлению в горизонтальной плоскости вращающего момента (рис. 5, б-в). Привод вибровозбудителя, а также привод механизма смещения фаз колебаний дебалансов управляющего вала осуществляется гидравлически.

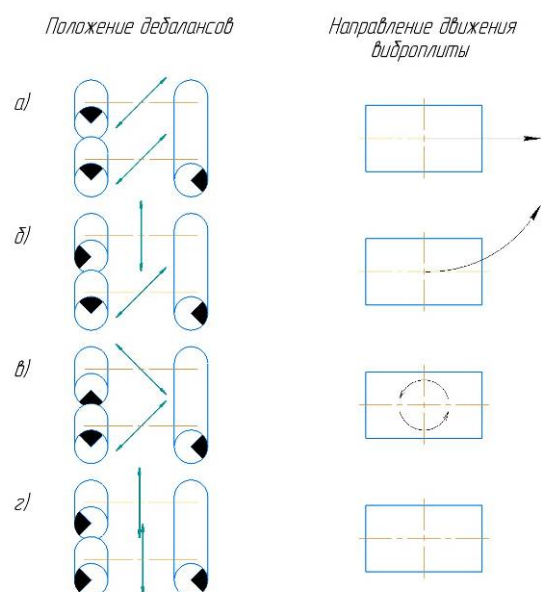


Рис. 5. Способы передвижения виброплиты с использованием трех дебалансов:

а – прямолинейное движение; б – движение по дуге; в – разворот на месте; г – вибрация на месте

Существует альтернативный способ изменения углового положения виброплит с дистанционным управлением. В данном случае опорная плита состоит из двух частей, каждая из которых содержит по одному двухвальному вибровозбудителю (рис. 6, а). Принцип управления такой виброплитой основан на изменении горизонтальной составляющей вынуждающей силы каждого вибровозбудителя. Для прямого или реверсивного движения эта составляющая направляется вперед или назад соответственно. При повороте, горизонтальная проекция вынуждающей силы одного из вибровозбудителей (находящегося на внешнем радиусе) оказывается выше, чем второго (находящегося на внутреннем радиусе). Поскольку вибровозбудители смещены относительно продольной оси виброплиты, разница в горизонтальной составляющей вынуждающей силы создает относительно центра масс виброплиты вращающий момент, который поворачивает виброплиту. Подобный механизм передвижения используется в виброплите Wacker Neuson DPU 130r.

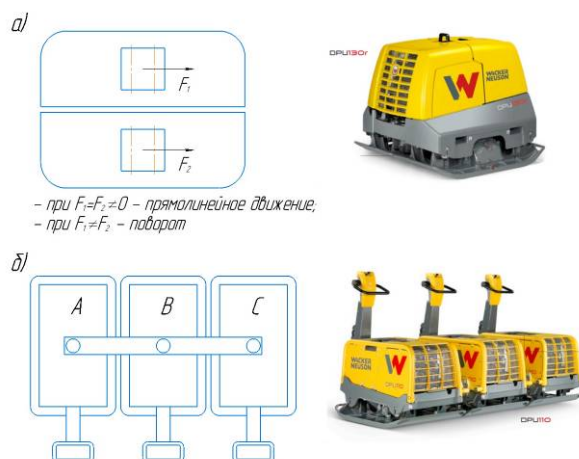


Рис. 6. Способ реализации вращательного движения виброплиты с использованием нескольких вибровозбудителей направленного действия: а – виброплита с двумя опорными плитами б – модульная машина из трех реверсивных виброплит [22]

Аналогичный принцип управления применяется при совместном использовании нескольких (двух, трех и более) виброплит, объединенных в один блок (рис. 6, б). В этом случае виброплиты соединяются между собой механически, а также посредством управляющего передатчика. Законы управления движением такой виброплитой приведены в табл. 1. Символы обозначают сигнал управления для каждой из трех виброплит:

- «+» - движение вперед;
- «-» - движение назад;
- «0» - работа на месте.

Таблица 1

Способ управления модульной грунтоуплотняющей машиной, состоящей из трех реверсивных виброплит

	Сигнал управления				
	Налево	Вперед	На-право	Назад	На месте
A	-	+	+	-	0
B	0	+	0	-	0
C	+	+	-	-	0

Примером такой конструкции является «coupling set» от компании Wacker Neuson (рис. 6), позволяющий объединить 3 виброплиты DPU110 в единый блок, управляемый оператором дистанционно. В результате ширина полосы уплотнения увеличивается до 3

м, суммарная величина вынуждающей силы достигает 330 кН, а масса составляет 2616 кг.

Недостатком описанных выше конструкций является ограниченная маневренность, поскольку они не обеспечивают возможности бокового движения, что могло бы быть полезно в условиях узких траншей. Исправить данную проблему можно путем изменения положения дебалансных валов на опорной плите.

Существует конструкция виброплиты с дистанционным управления, содержащая 4 дебалансных вала, установленных по углам опорной плиты под углом 90 град друг относительно друга и вращающихся с одинаковой угловой скоростью (рис. 7). Направления вращения дебалансных валов (на рис. 7 обозначены зеленым цветом) задаются таким образом, чтобы каждая пара дебалансных валов вращалась в противоположные направления. При этом один из дебалансов (обозначен на Рис. 7 красным цветом) является основным и не имеет механизма изменения фазы колебаний, тогда как 3 других (обозначены на рис. 7 желтым цветом) являются управляющими и оснащены механизмом изменения фазы колебаний. В случае, когда фазы колебаний всех дебалансов совпадают (рис. 7, б), суммарная вынуждающая сила имеет только вертикальную составляющую (горизонтальные составляющие взаимокompенсируются), за счет чего виброплита работает на месте. При смещении фазы колебаний двух диагонально расположенных дебалансов (2 и 4) на 90 град (рис. 7, в) возникает вращающий момент, который поворачивает виброплиту. Для прямолинейного движения (рис. 7, г) фаза колебаний двух передних (2 и 3) и двух задних (1 и 4) дебалансов должны совпадать между собой, а фазы колебаний двух правых (1 и 2) и двух левых (3 и 4) дебалансов должны различаться на одинаковый угол. Изменение фаз колебаний дебалансов позволяет задавать прямолинейное движение в прямом, реверсивном и боковом направлениях.

Существует рабочий прототип четырехвальной виброплиты AMMANN eAPX 68/95, однако до сих пор отсутствуют промышлен-

но выпускаемые образцы данного типа виброплит.

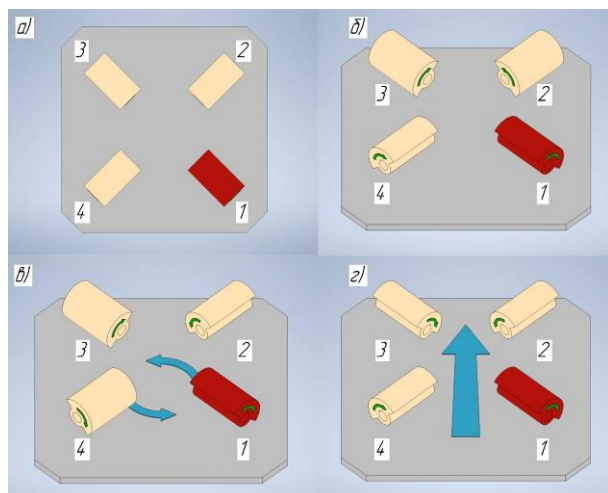


Рис. 7. Механизм передвижения четырехвальной виброплиты с угловым расположением дебалансных валов: а – общая схема; б – работа на месте; в – разворот на месте; г – прямолинейное движение.

В описанной конструкции дебалансные валы расположены симметрично относительно основания, имеют одинаковую массу и попарно соосны между собой. В патенте, принадлежащем компании Wacker Neuson [23], предлагаются различные модификации данной конструкции. Например, путем нарушения соосности диагонально установленных дебалансов можно добиться одновременной генерации как продольной, так и поперечной составляющей вынуждающей силы, что позволит использовать виброплиту для работы на поперечных уклонах без увода ее в сторону. Также предлагается расположить дебалансные валы под углами, не равными 90 град, или использовать дебалансы различной массы, что позволит задать приоритетные направления движения виброплиты. Однако подобные конструкции до сих пор не нашли широкого применения.

Следует отметить, что увеличение числа дебалансных валов позволяет достигать более высоких значений вынуждающей силы, что требуется при эксплуатации средних и тяжелых виброплит (рис. 8). При этом для всех типов виброплит наблюдается схожий характер зависимости вынуждающей силы

от массы. Диапазоны изменения основных параметров для различных типов виброплит приведены в табл. 2.

4. Обсуждение

В течение последних десятилетий у производителей сформировалось представление об области применения основных типов грунтоуплотняющих машин. Так, в середине XX века существовали виброплиты массой более 1000 кг, что с учетом сложности обеспечения высоких значений относительной вынуждающей силы требовало применения дополнительных элементов конструкции, обеспечивающих самоходное передвижение виброплиты. При этом высокая масса и большие габариты виброплит ставили их в один ряд с другими грунтоуплотняющими машинами (трамбуемые машины и катки).

Масса большинства современных виброплит не превышает 830 кг, что связано с разделением области использования самоходных виброплит и более тяжелых видов грунтоуплотняющих машин – в первую очередь, грунтовых катков. Первые используются в качестве мобильного оборудования, которое можно легко перевозить между площадками и использовать в ограниченном пространстве. Вторые обеспечивают высокую производительность на крупных строительных площадках. Для повышения производительности могут применяться модульные системы, объединяющие 2 и более виброплит в единый блок.

Механический привод передвижения вибрационных плит (лебедка, шагающий ход и т.д.) в настоящее время не применяется, поскольку он вытеснен другими, более совершенными вариантами конструкции.

В последние годы заметно выросло количество конструкций виброплит, обеспечивающих возможность применения на них системы дистанционного управления. Это позволяет полностью решить вопрос вибрационной безопасности оборудования, поскольку органы управления виброплиты, с которыми контактирует оператор, оказываются

изолированы от вибровозбудителя. Кроме того, система дистанционного управ-

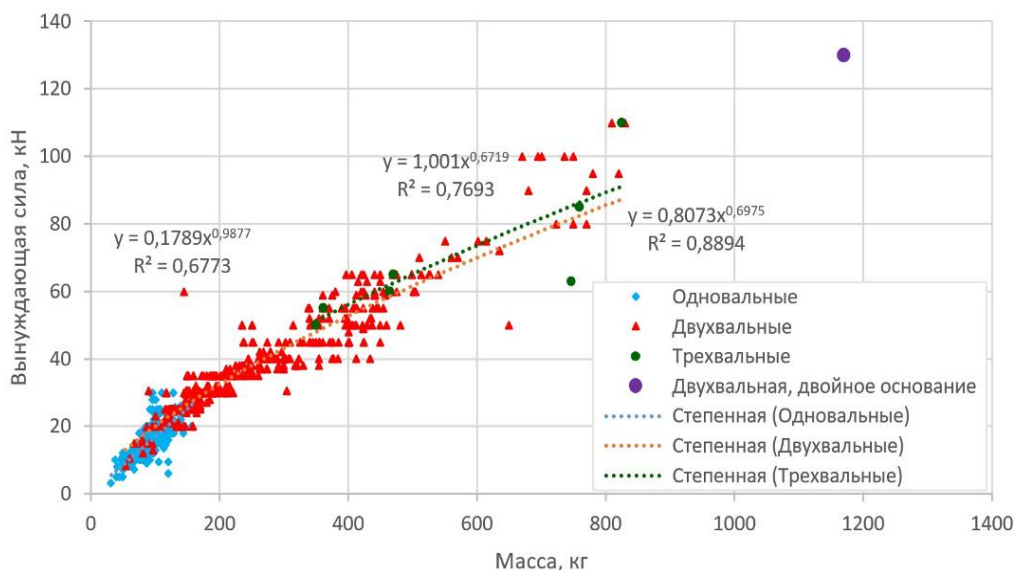


Рис. 8. Взаимосвязь массы и вынуждающей силы виброплит с конструкцией вибровозбудителя

Таблица 2

Диапазоны изменения параметров различных типов виброплит

Параметр	Тип виброплиты			
	Одновальные	Двухвальные	Трехвальные	Двухвальные, двойное основание
Масса плиты М, кг	32...1170			
	32...160	54...830	350...825	1170
Вынуждающая сила Р, кН	3,25...130			
	3,25...30	8,2...110	50...110	130
Частота колебаний f, Гц	30,5...126			
	47,5...126	30,5...117	46...70	58
Мощность двигателя N, кВт	0,25...21			
	0,25...6,3	1,8...17	7...17,5	21
Относительная вынуждающая сила P/Q	5,1...42,18			
	5,1...33,24	7,66...42,18	8,6...15,49	11,33

ления обеспечивает безопасную работу виброплиты в траншеях.

Как можно увидеть из анализа конструкций, в последние годы важными направлениями развития виброплит являются обеспечение более равномерного распределения контактных напряжений по опорной поверхности, а также повышение маневренности. Обе задачи в представленных конструкциях решаются увеличением количества дебалансных валов.

Вместе с тем, плохо изученным остается вопрос использования самоходных вибро-

плит на уклонах. Отсутствует информация о том, как меняется уплотняющая способность виброплиты при движении на продольных и поперечных уклонах. Также отсутствуют исследования, касающиеся рационального выбора соотношения массы опорной плиты и рамы виброплиты.

Количество дебалансных валов не влияет на характер зависимости вынуждающей силы от массы. Тем не менее, большее количество дебалансных валов позволяет увеличить значение вынуждающей силы, что требуется

на виброплитах с высокой массой и большой площадью основания.

Наблюдается общая тенденция по увеличению количества дебалансных валов (в том числе, с возможностью смещения фазы колебаний друг относительно друга) среди промышленно выпускаемых моделей самоходных виброплит.

5. Заключение

Собранные данные позволяют выделить основные типы конструкций виброплит с точки зрения способа обеспечения их самоходности. Наибольшее распространение получили нереверсивные виброплиты с одновальным возбудителем круговых колебаний и реверсивные виброплиты с двухвальным вибровозбудителем направленного действия, которые уже успели доказать свою эффективность.

Для тяжелых виброплит характерна большая площадь основания. Чтобы сохранить высокие значения контактных напряжений на таких виброплитах, требуется увеличить вынуждающую силу. В ряде случаев

целесообразно использовать для этого несколько дебалансных валов, что позволит также обеспечить более равномерное распределение контактных напряжений.

Разнообразие конструкций виброплит с дистанционным управлением может указывать на то, что у производителей до сих пор не сложилось единого мнения об оптимальной компоновке виброплиты с дистанционным управлением. Сравнение различных конструкций с точки зрения энергоэффективности, производительности и уплотняющей способности может стать темой для дальнейших исследований.

Особый интерес представляет задача рационального выбора соотношения массы основания и рамы виброплит. Как видно из рис. 2, рама выступает ограничителем при движении основания к верхней мертвой точке. Повышение массы рамы, до определенного предела, может положительно влиять на самоходные свойства и уплотняющую способность виброплит за счет снижения времени отрыва основания от грунта. Данный вопрос также может стать темой для дальнейших исследований.

Список литературы

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018, 143 с.
2. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 65-68.
3. Czech K., Gosk W. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. No. 2. DOI: 10.3390/app9020336.
4. Wang C., Qiu T., Xiao M., Wang J. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor // Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice. 2017. Vol. 8. No. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.
5. Czech K., Gosk W. The Impact of

References

1. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A. *Uplotnenie gruntov vibratsionnymi plitami* [Soil compaction using vibratory plate compactors]. Yaroslavl, Izdat. dom YSTU, 2018, 143 p. (In Russian).
2. Kuzmichev V. . Mathematical model of plate compactors. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2012, No. 3, pp. 65-68. (In Russian).
3. Czech K., Gosk W. Impact of the Operation of a Tri-band Hydraulic Compactor on the Technical Condition of a Residential Building. *Applied Sciences*, 2019, Vol. 9, No. 2. DOI: 10.3390/app9020336.
4. Wang C., Qiu T., Xiao M., Wang J. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2017, Vol. 8, No. 4. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment // *Procedia Engineering*. 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.077.

6. Massarsch K.R., Wersäll, C. Vibratory plate resonance compaction // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 2019. P. 127-130. DOI: 10.1680/jgeen.19.00169.

7. Кузьмичев, В. Д. Разработка динамической модели самоходной нереверсивной виброплиты // *Механика XXI века*. 2012. № 11. С. 39-45.

8. Тюремнов И. С., Ефимов С.С. Моделирование взаимодействия виброплиты с поверхностью грунта // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2022. № 4. С. 30-41. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.04.

9. Евсеев Е. Ю., Матвеев В.Н., Зубков А.Ф. Моделирование процесса взаимодействия вибровибриционной плиты с горячей асфальтобетонной смесью при ремонте // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура*. 2012. № 4. С. 70-77.

10. Кузьмичев В. А., Кузьмичев В.Д. Методика расчета гидравлического механизма реверса самоходных виброплит // *Системы. Методы. Технологии*. 2012. № 1. С. 53-57.

11. Morariu-Gligor R.M., Crisan A.V., Serdean F.M. Optimal design of a one-way plate compactor // *Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics and Mechanics*. 2017. Vol. 60. No 4. pp. 557–564.

12. Anderegg R., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. DOI: 10.1061/40803(187)41.

13. Kwaśniewski A., Maciejewski J., Bąk S. Monitoring soil state during compaction process using a vibrating rammer and a plate compactor // *Journal of Terramechanics*. 2022. Vol. 100. pp. 61-72. DOI: 10.1016/j.jterra.2022.01.002.

14. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Расу-

5. Czech K., Gosk W. The Impact of Work of Hydraulic Compactor Type V8 from MTS on the Level of Vibrations Propagated to the Environment. *Procedia Engineering*, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.077.

6. Massarsch K.R., Wersäll C. Vibratory plate resonance compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2019, pp. 127-130. doi: 10.1680/jgeen.19.00169.

7. Kuzmichev V.D. Development of a dynamic model of forward plate compactor. *Mekhanika XXI veku*, 2012, No. 11, pp. 39-45. (In Russian).

8. Tyuremnov I.S., Efimov S.S. Modeling the interaction of a plate compactor with the soil surface. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2022, No. 4, pp. 30-41. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.4.04. (In Russian).

9. Evseev E.Yu., Matveev V.N., Zubkov A.F. Modeling the interaction process of a plate compactor with hot asphalt concrete mixture during road surface repair. *Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2012, No. 4, pp. 70-77. (In Russian).

10. Kuzmichev V.A., Kuzmichev V.D. Methodology for calculating the hydraulic mechanism of the reverse of plate compactors *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2012, No. 1, pp. 53-57. (In Russian).

11. Morariu-Gligor R.M., Crisan A.V., Serdean F.M. Optimal design of a one-way plate compactor. *Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, Vol 60, No. 4. pp. 557–564.

12. Anderegg R., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. doi: 10.1061/40803(187)41.

13. Kwaśniewski A., Maciejewski J., Bąk S. Monitoring soil state during compaction process using a vibrating rammer and a plate compactor. *Journal of Terramechanics*, Vol. 100, pp. 61-72. DOI: 10.1016/j.jterra.2022.01.002.

14. Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Rac-

лов Р.А. Компоновка самоходных вибрационных уплотнителей // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 4. С. 163-169. DOI: 10.5862/JEST.231.17.

15. Башкарев А.Я., Мусияко Д.В., Пешков В.С. Вибрационное перемещение поверхностного уплотнителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1. С. 175-178.

16. Мусияко Д.В., Расулов Р.А. Самоходная вибрационная плита с вальцем // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 4. С. 73-80.

17. Кузьмичев В.А., Кузьмичев В.Д. Исследование рабочих параметров самоходных виброплит, применяемых при уплотнении грунтов // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3. С. 66-71.

18. Попов Г.Н., Шестопалов А.А. К вопросу о выборе рациональной скорости движения вибрационных грунтоуплотняющих машин. // Труды ЛПИ. 1970. № 314. С. 105-109.

19. Афанасьев М.А., Тюремнов И.С. Статистический анализ технических характеристик самоходных неререверсивных виброплит с различными типами двигателей // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2024. Т. 21, № 4. С. 488-501. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501.

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

21. Oscillation exciter / M. Awrath. - U.S. Patent No. 8,256,987. Appl. 25.03.2010. No. 12/439,867. Date of Patent: 04.09.2012.

22. Wacker Neuson [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wackerneuson.com> (дата обращения 12.07.2024).

23. Vibrating plate with unbalanced shafts arranged at an angle / O.W. Stenzel - U.S. Patent No. 8,721,218. Appl. 19.04.2010. No. 11/993,131. Date of Patent: 13.05.2014.

ulov R.A. Layout of self-propelled vibratory compactors. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2015, № 4, pp. 163-169. DOI: 10.5862/JEST.231.17. (In Russian).

15. Bashkarev A.Ya., Musiyako D.V., Peshkov V.S. Vibratory movement of the surface compactor. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, No. 1, pp. 175-178. (In Russian).

16. Musiyako D.V., Rasulov R.A. Self-propelled plate compactor with a roller. *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No. 4, pp. 73-80. (In Russian).

17. Kuzmichev V.A., Kuzmichev V.D. Study of the operating parameters of self-propelled plate compactors used for soil compaction. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*, 2011, No. 3, pp. 66-71. (In Russian).

18. Popov G.N., Shestopalov A.A. On the issue of choosing a rational speed of movement of vibratory soil compaction machines. *Trudy LPI*, 1970, No. 314, pp. 105-109. (In Russian).

19. Afanasev M.A., Tyuremnov I.S. Statistical analysis of technical specifications for non-reversible plate vibrators with different types of engines. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2024, Vol. 21, No. 4, pp. 488-501. DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-488-501. (In Russian).

20. Kharkhuta N.Ya., Vasilev Yu.M. *Strength, stability and compaction of roadbed soils*. Moscow, Transport, 1975, 288 p. (In Russian)

21. Patent US 8,256,987. *Oscillation exciter*. Awrath M. Declared 25.03.2010. Published 04.09.2012.

22. Wacker Neuson. Available at: <https://www.wackerneuson.com>.

23. Patent US 8,721,218. *Vibrating plate with unbalanced shafts arranged at an angle*. Stenzel O.W. Declared 19.04.2010. Published 13.05.2014.