

УДК (УДК) 625.76.08

АНАЛИЗ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
САМОХОДНЫХ ВИБРОПЛИТANALYSIS OF MANUFACTURER'S RECOMMENDATIONS FOR THE USE OF
VIBRATORY PLATE COMPACTORSАфанасьев 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 – грунтоуплотняющие машины поверхностного действия с плоским рабочим органом, который вводится в состояние колебательных движений и обеспечивает перемещение виброплиты по поверхности грунта. Промышленно выпускаемые образцы самоходных виброплит существенно различаются по техническим характеристикам, что обуславливает различия в эффективности их использования на различных типах грунтов и в различных условиях выполнения работ. Данный факт в значительной степени затрудняет как проектирование новых моделей самоходных виброплит, так и выбор подходящих моделей для уплотнения грунтов в различных условиях выполнения работ. В то же время, значительная часть производителей приводят весьма ограниченные рекомендации по технологическим возможностям различных моделей виброплит, что увеличивает риск недостаточного уплотнения грунта и снижения срока службы возводимых на нем сооружений. Целью исследования являлся сбор данных о промышленно выпускаемых моделях виброплит, а также анализ рекомендаций производителей по использованию самоходных виброплит в различных условиях выполнения работ. Собранные данные позволяют оценить накопленный опыт по разработке и совершенствованию линеек самоходных виброплит и могут быть использованы при проектировании новых моделей поверхностных грунтоуплотняющих машин.

Ключевые слова: виброплита, уплотнение грунта, вибрация, виброплита неререверсивная, виброплита реверсивная.

Дата получения статьи: 06.08.2024
Дата принятия к публикации: 03.10.2024
Дата публикации: 25.12.2024

Сведения об авторах:

Афанасьев Михаил Александрович – аспирант, ассистент кафедры «Строительные и дорожные машины» ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
e-mail: afanasiev.m.a2016@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5059-2557>

Abstract. Self-propelled vibratory plate compactors are surface compaction machines with a flat operating device, which is introduced into a state of oscillatory movements and causes the movement of the machine itself along the soil surface. Industrially produced plate compactors differ significantly in technical specifications, which causes differences in the effectiveness of their use on different types of soil and under various conditions. This fact sufficiently complicates both the design of new models of vibratory plate compactors and the selection of suitable models for soil compaction under various conditions. A significant part of manufacturers provides limited recommendations of the technological capabilities of various models of vibratory plate compactors which increases the risk of insufficient soil compaction and a decrease in the service life of structures built on it. The purpose of the study was to collect data on industrially produced models of vibratory plate compactors, as well as to analyze manufacturers' recommendations for the use of vibratory plate compactors in various conditions. The collected data allows us to evaluate the gathered experience in the development and improvement of model lines of vibratory plate compactors and can be used when designing new models of vibratory plate compactors.

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

Date of manuscript reception: 06.08.2024
Date of acceptance for publication: 03.10.2024
Date of publication: 25.12.2024

Authors' information:

Mikhail A. Afanasev – postgraduate student, assistant of the Construction and road machines Department at Yaroslavl State Technical University;
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>

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

Самоходные виброплиты (далее – виброплиты) – это грунтоуплотняющие машины с плоским рабочим органом, который вводится в состояние колебательного движения и перемещается по поверхности грунта. Как правило, виброплиты применяются для уплотнения несвязных грунтов в тех случаях, когда затруднено использование других видов грунтоуплотняющих машин: в траншеях и котлованах, вблизи фундаментов, столбов и изгородей, при частом перемещении между участками проведения работ и т.д.

Виброплиты классифицируются [1]:

- по массе (сверхлегкие – менее 100 кг, легкие – 100...200 кг, средние – 200...500 кг, тяжелые – более 500 кг);
- по способу передвижения (реверсивные и нереверсивные);
- по типу двигателя (бензиновые, дизельные и электрические);
- по способу управления (ручное и дистанционное).

Основными параметрами виброплит являются масса M , кг, частота колебаний f , Гц, и вынуждающая сила P , кН, вибровозбудителя. К дополнительным параметрам относятся мощность двигателя N , кВт, длина L , мм, и ширина B , мм, основания, а также относительная вынуждающая сила P/Q (определяется как отношение вынуждающей силы P к весу виброплиты Q).

Существующие исследования виброплит затрагивают вопросы повышения производительности и снижения себестоимости оборудования [2-3], защиты оператора от вибрационных воздействий [4], влияния вибрационного воздействия при работе вблизи сооружений [5-6], а также условий обеспечения самоходности [7-9].

Важным направлением развития грунтоуплотняющих машин в целом является

разработка систем контроля качества уплотнения и внедрение так называемых систем «интеллектуального» уплотнения, которые получили широкое распространение на вибрационных катках [10-15]. Однако, ввиду сложного характера взаимодействия основания виброплиты с грунтом и неравномерности распределения контактных напряжений по поверхности основания, применение таких систем на виброплитах затруднено и исследовано в меньшей степени [16].

При использовании самоходных виброплит большое значение имеет адекватный выбор модели с учетом ее технологических возможностей (т.е. возможностей использования виброплиты в заданных условиях, определяемых типом и влажностью уплотняемого грунта, толщиной уплотняемого слоя и требуемым коэффициентом уплотнения), а также назначение режима ее работы (который определяется количеством циклов приложения нагрузки на грунт в одной точке, необходимым для обеспечения заданного коэффициента уплотнения при заданных влажности и типе грунта, а также заданной толщине уплотняемого слоя).

Исследователями предпринимались попытки связать количество проходов по одному следу со скоростью виброплиты, частотой колебаний вибровозбудителя и характеристиками грунта. Однако зачастую при этом не учитывался ни коэффициент уплотнения грунта, ни влияние длины основания на величину контактных давлений, ни ряд других факторов. Например, не был учтен отрывной характер взаимодействия основания виброплиты с грунтом (поскольку для виброплит характерны отрывные колебания с кратностью в 2 и более раза, из-за чего частота колебаний вибровозбудителя не совпадает с частотой приложения нагрузки к грунту). Анализ технических характеристик реверсивных и нереверсивных виброплит с

различными типами двигателей показывает, что у производителей также отсутствуют достоверные методики, позволяющие оценить влияние технических характеристик на результат уплотнения грунта в различных условиях выполнения работ.

В этой связи представляют интерес рекомендации производителей, касающиеся технологических возможностей виброплит и назначения режима их работы. Существующие исследования по данной теме [17] предлагают достаточно ограниченную выборку виброплит, поэтому целесообразно проведение дополнительного анализа.

Целью данного исследования являлись сбор и систематизация данных, касающихся рекомендаций производителей о технологических возможностях и назначении режимов работы выпускаемых виброплит.

2. Материалы и методы

Анализ выполнен на основе данных о технических характеристиках и технологических возможностях самоходных виброплит, предоставленных на сайтах производителей и их дилеров, а также в программе CompBase.

В ходе исследования были рассмотрены виброплиты 67 производителей, включая как отечественных (Сплитстоун, Красный маяк, Техком, Вибромаш и др.), так и зарубежных (Wacker Neuson, Batmatic, AMANN, Belle, BOMAG, Dynapac, Mikasa, NTC, Zitrek, Weber, Husqvarna, KOMAN, Lifan, MBW и др.) производителей.

3. Результаты

Исследование показало, что среди 67 рассмотренных производителей только 10 приводят данные о технологических возможностях виброплит. В это число входят виброплиты марок Сплитстоун, AMMANN, BOMAG, Champion, Delta Jeonil, DYNAPAC, Fox Weld, Spektrum, Tremix, Wacker Neuson. Остальные производители, если и указывают глубину уплотнения, не приводят никакой информации о том, при каких условиях она может быть достигнута.

Для виброплит марок Champion и Spektrum производители указывают лишь данные о глубине уплотнения для одного материала (щебень с фракцией >15 мм и песок соответственно), не указывая ни коэффициент уплотнения, ни количество проходов, необходимое для достижения требуемого коэффициента уплотнения.

Fox Weld классифицирует собственные виброплиты, исходя из типа выполняемых ими работ. Так, для укладки плитки, ямочного ремонта дороги, укладки асфальта и строительства дорог рекомендуется использовать модели FTL PCF 70, FTL PCF 80, FTL PCF 80H, FTL PCF 100, FTL PCF 100H; а для уплотнения траншей и котлованов, щебня и сыпучих материалов предназначены модели FTL PCF 100, FTL PCF 100H, FTL PCF 150H, FTL PCF 150H, FTL PCF 150H1 (табл. 1). При этом производитель не только не указывает информацию о требуемом количестве проходов и толщине уплотняемого слоя, но и не приводит данных о том, как меняются технологические возможности виброплит на различных типах грунта.

Компания Tremix приводит схожую классификацию, но уже с учетом типа грунта (табл. 2). Исходя из этих рекомендаций, тяжелые виброплиты Tremix пригодны для уплотнения ила и каменной отсыпки с размером зерен $D \leq 15$ см, модели с системой подачи воды пригодны для уплотнения асфальта, виброплиты с резиновой накладкой используются для укладки тротуарной плитки. Для уплотнения песка и гравия пригодны любые модели, а для уплотнения глины виброплиты Tremix не пригодны.

В то же время, производитель не приводит информацию о толщине уплотняемого слоя, количестве проходов для достижения различных требуемых коэффициентов уплотнения грунта.

Для виброплит марки Delta Jeonil приводятся данные о глубине уплотнения песка и гравия за 1 проход (табл. 3). При этом остается неизвестен коэффициент уплотнения, а также возможность использования виброплит на других типах грунта.

Более подробную информацию о технологических возможностях своих виброплит предоставляет отечественная компания Сплитстоун. Для каждой виброплиты приведены рекомендованные (+), допустимые (0) и нерекондованные (-) типы уплотняемого материала (табл. 4). Также дается информа-

ция о глубине уплотнения сыпучих материалов до коэффициента уплотнения 0,97 за 4 прохода (табл. 5). В то же время, остается неизвестно, как технологические возможности виброплит Сплитстоун изменяются в зависимости от типа грунта.

Таблица 1

Технологические возможности виброплит Fox Weld [18]

Модель	Укладка плитки, ямочный ремонт дорог	Укладка асфальта	Строительство и ремонт дорог	Уплотнение траншей и котлованов, щебень, сыпучие материалы
FTL PCF 70	+	+	+	-
FTL PCF 80	+	+	+	-
FTL PCF 80H	+	+	+	-
FTL PCF 100	+	+	+	+
FTL PCF 100H	+	+	+	+
FTL PCF 150	-	-	-	+
FTL PCF 150H	-	-	-	+
FTL PCF 150H1	-	-	-	+

Таблица 2

Технологические возможности виброплит Tremix [19]

Модель	Глина	Ил	Песок/гравий	Каменная отсыпка D≤15 см	Асфальт	Бетонные блоки
MV40	-	-	+	-	-	-
MV65	-	-	+	-	-	+
MV70	-	-	+	-	+	-
MV80	-	-	+	-	-	+
MV92	-	-	+	-	+	+
MV130	-	-	+	-	-	-
MV165	-	-	+	-	-	+
MV170D	-	-	+	-	-	+
MV220	-	-	+	-	-	+
MV230D	-	-	+	-	-	+
MV245DE	-	-	+	-	-	+
MV305	-	+	+	-	-	-
MV320DE	-	+	+	-	-	-
MV440	-	+	+	-	-	-
MV480	-	-	+	+	-	+
		Тяжелые виброплиты	Любые виброплиты	Тяжелые виброплиты	Виброплиты с системой подачи воды	Виброплиты с резиновой накладкой

Таблица 3

Технологические возможности виброплит Delta Jeonil [20]

Модель	Вынуждающая сила, кН	Частота вибрации, Гц	Масса, кг	Скорость передвижения, см/с	Глубина уплотнения песка, мм	Глубина уплотнения гравия, мм
JPC-60WT	11,1	95	69	42	90	150
JPC-90WT	14	95	83	42	100	180
JPC-940WT	15	100	70	42	100	180
JPC-80JWT	19,6	107	89	42	110	200
JPC-120JWT	23,5	107	105	42	170	220

Таблица 4

Рекомендации по использованию виброплит Сплитстоун [21]

Модель	Щебень	Грунты (смешанный грунт, суглинки)	Песок	Тротуарная плитка (при наличии демпфирующего коврика)	Асфальт
VS-104	-	0	0	0	0
VS-134	-	0	0	0	0
VS-244	0	0	0	+	+
VS-245 E6	0	0	0	+	+
VS-245 E8	0	0	0	+	+
VS-245 E10	0	0	0	+	0
VS-246 E12	0	+	0	+	0
VS-246 E20	0	+	+	0	-
VS-309	+	+	+	-	-

Таблица 5

Технологические возможности виброплит Сплитстоун [21]

Модель	Вынуждающая сила, кН	Частота вибрации, Гц	Масса, кг	Скорость передвижения, см/с	Производительность, м ² /ч	Глубина уплотнения, мм
VS-104	10	100	57	42	100	100
VS-134	11	10	70	42	100	100
VS-244	13,5	93	85	42	140	200
VS-245 E6	16	94	103	42	140	210
VS-245 E8	18,8	94	118	42	140	220
VS-245 E10	22	94	128	42	140	230
VS-246 E12	26	82	140	42	150	250
VS-246 E20	30	82	160	42	160	300
VS-309	40	72	300	42	180	400

Компания AMMANN указывает глубину уплотнения с учетом типа грунта, но без учета коэффициента уплотнения (табл. 6). Интересно отметить, что в отличие от Tremix, компания AMMANN не только допускает уплотнение глины отдельными моделями самоходных виброплит, но даже рекомендует их для этой цели, указывая, в том числе, глубины уплотнения. Тем не менее, количество

проходов для достижения требуемой плотности производителем также не указаны.

Компания BOMAG приводит более подробную информацию о технологических возможностях своих виброплит (табл. 7). Уплотняемые материалы разделены на 5 групп: камень, щебень, гравий/песок, смешанные почвы и глина/ил. Толщина уплотняемого слоя указана для каждой группы материалов в виде диапазона: до и после уплот-

Таблица 6

Технологические возможности виброплит AMMANN [22]

Модель	Глубина уплотнения, мм				
	Песок/ гравий	Смешанные грунты	Связные грунты	Переувлажненные грунты	Щебень
APF 10/33	100	100	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APF 12/40	200	150	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APF 12/50	200	150	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APF 15/40	200	150	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APF 15/50	150	100	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APF 20/50	250	200	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APR 22/40	300	250	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APR 25/40	350	300	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APR 25/50	350	300	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APR 30/450	400	350	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	Не пригодна
APR 30/60	400	350	Пригодна с ограничениями	Пригодна с ограничениями	100
APR 40/60	450	400	Пригодна с ограничениями	200	150
APR 49/20	500	450	200	300	200
APR 59/20	550	500	250	400	250
APH 50/75	500	450	200	300	200
APH 60/85	600	450	200	400	200
APH 55/75	500	450	250	300	200
APH 65/85	550	600	350	500	300
APH 85/95	500	650	400	500	300
APH 110-95	650	800	550	650	400

Таблица 7

Технологические возможности виброплит BOMAG [23]

Модель	Вынуждающая сила, кН	Масса, кг	Толщина уплотняемого слоя до/после уплотнения, см				
			Камень	Щебень	Гравий/песок	Смешанные почвы	Глина/ил
BP 10/35	10	65	-	-	25/20	20/15	-
BP 12/40	12	72	-	-	25/20	20/15	-
BP 12/50 A	12	82	-	-	25/20	20/15	-
BP 20/50	20	95	-	-	25/20	20/15	-
BVP 10/36	10	83	-	-	25/20	20/15	-
BVP 12/50 A	12	72	-	-	25/20	20/15	-
BVP 18/45	18	91	-	-	25/20	20/15	-
BP 20/50 D	20	109	-	-	30/25	25/20	-

Окончание табл. 7

Модель	Вынуждающая сила, кН	Масса, кг	Толщина уплотняемого слоя до/после уплотнения, см				
			Камень	Щебень	Гравий/песок	Смешанные почвы	Глина/ил
BP 25/50 D	25	122	-	15/13	35/30	30/25	20/15
BPR 25/40 D	25	135	-	15/13	35/30	30/25	20/15
BPR 25/50 D	25	150	-	15/13	35/30	30/25	20/15
BPR 35/42 D	35	210	-	20/15	35/30	30/25	20/15
BPR 35/60 D	35	205	-	20/15	35/30	30/25	20/15
BPR 40/60 D	40	260	-	20/15	35/30	30/25	20/15
BPR 45/45	45	355	-	30/25	50/40	45/35	30/25
BPR 50/55 D	50	405	-	30/25	50/40	45/35	30/25
BPR 55/65 D	55	455	-	30/25	50/40	45/35	30/25
BPR 60/65 D	60	420	-	30/25	50/40	45/35	30/25
BPR 70/70 D	70	570	35/30	40/35	55/45	50/40	35/30
BPR 100/80 D	100	700	35/30	45/40	75/60	60/50	40/35
BPH 80/65 S	80	750	50/45	45/40	75/60	60/50	40/35

Таблица 8

Технологические возможности виброплит Wacker Neuson [24]

Тип оборудования		Тип грунта					
	Рабочая масса, кг	Несвязные грунты		Смешанные грунты		Связные грунты	
		толщина слоя, мм	количество проходов	толщина слоя, мм	количество проходов	толщина слоя, мм	количество проходов
Легкое оборудование							
Вибротрамбовки (легкие)	до 25	до 152	2...4	до 152	2...4	до 102	2...4
Вибротрамбовки (средние)	25...60	203...406	2...4	152...305	3...5	102...305	2...4
Виброплиты (легкие)	60...90	до 203	3...5	до 152	4...6	-	-
Виброплиты (средние)	90...300	203...305	3...5	152...254	4...6	-	-
Виброкатки (легкие)	до 600	203...305	4...6	152...254	5...6	-	-
Средне-тяжелое и тяжелое оборудование							
Вибротрамбовки (средние)	25...60	203...406	2...4	152...305	2...4	102...305	2...4
Вибротрамбовки (тяжелые)	60...200	406...508	2...4	203...406	2...4	203...305	2...4
Виброплиты (средние)	300...750	305...508	3...5	203...406	3...5	-	-
Виброплиты (тяжелые)	более 750	406...711	3...5	406...508	3...5	-	-
Виброкатки	600...730	203...508	4...6	203...406	5...6	-	-

нения. Производитель также отмечает, что уплотнение достигается за 4-8 проходов, но при этом не указывает коэффициент уплотнения.

Компания Wacker Neuson дает рекомендации о том, для каких видов работ пригоден каждый тип грунтоуплотняющих машин в целом. Таким образом, производитель рекомендует использовать виброплиты для уп-

лотнения широких траншей, оснований строений, пешеходных и велодорожек, спортивных и игровых площадок, железнодорожных конструкций. При строительстве гидротехнических сооружений, дорожных конструкций и узких траншей виброплиты не являются оптимальным вариантом, но также допустимы.

Как видно из табл. 8, виброплиты Wacker Neuson, вне зависимости от собственной массы, пригодны для уплотнения несвязных и смешанных грунтов, но не пригодны для уплотнения связных грунтов. В таблице производитель указывает толщину уплотняемого слоя и требуемое количество проходов, но не приводит коэффициент уплотнения.

Компания Дупарас предлагает для обоснования выбора виброплиты использовать программу CompBase, которая содержит информацию о практических испытаниях различных классов грунтоуплотняющих машин производства Дупарас. На сегодняшний день данная программа является одним из наиболее полных источников данных о технологических возможностях виброплит.

CompBase позволяет определить глубину уплотнения грунта при различных значениях коэффициента уплотнения и количества проходов (рис. 1). Также с ее помощью можно оценить степень уплотнения грунта (по стандартному Проктору), в зависимости от толщины уплотняемого слоя и числа проходов (рис. 1). Указанная информация приведена для песка и супеси. Также программа

содержит данные о производительности виброплит Дупарас.

3. Обсуждение

Только 10 из 67 рассмотренных производителей приводят информацию о технологических возможностях виброплит. При этом лишь 4 производителя указывают данные, достаточные для обоснования выбора модели грунтоуплотняющей машины. Однако даже в этом случае информация остается неполной и, зачастую, не содержит данных о достигаемом коэффициенте уплотнения грунта.

Важно отметить, что производители приводят информацию только о собственной продукции, что затрудняет сравнение технологических возможностей виброплит, выпускаемых разными компаниями. Кроме того, приводимая информация зачастую весьма противоречива. Например, компании AMMANN и BOMAG допускают использование отдельных моделей виброплит для уплотнения связных грунтов, в то время компании Tremix и Wacker Neuson не допускают этого вне зависимости от технических характеристик виброплиты.

Также следует отметить, что все компании приводят данные, полученные на основе испытаний уже существующих моделей виброплит в заданных условиях. Таким образом, существующие рекомендации не могут быть использованы при разработке новых моделей виброплит.

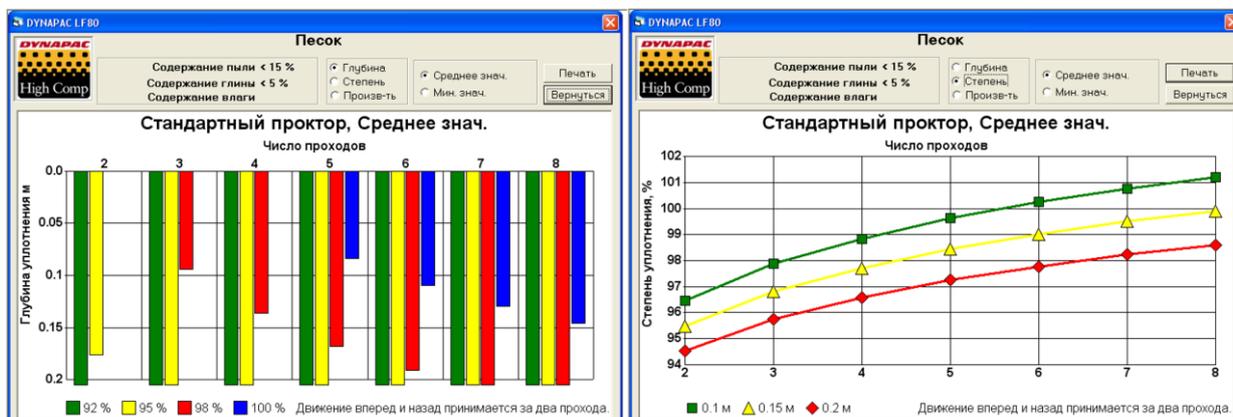


Рис. 1. Значения глубины и степени уплотнения для виброплиты Дупарас

4. Заключение

Таким образом, рекомендации производителей не представляют исчерпывающей

информации о технологических возможностях и назначении режима работы самоходных виброплит. Все предоставленные данные получены на основе испытаний уже существующих моделей. Отсюда можно сделать предположение о том, что у производителей отсутствуют методики, позволяющие прогнозировать влияние технических характеристик виброплит на их технологические возможности. Это является частью более широкой проблемы прогнозирования результатов уплотнения грунтов с использованием виброплит, а также других видов грунтоуплотняющих машин вибрационного действия (в частности, виброкатков и навесных экскаваторных виброплит [25, 26]). В результате повышается риск недостаточного уплотнения грунта. Разработка таких методик затруднена в связи со сложным характером взаимодействия основания виброплиты с уплотняемым грунтом, а также тем, что свой-

ства различных видов грунтов остаются не до конца изученными.

Таким образом, актуальной задачей является разработка методики для оценки влияния технических характеристик виброплит на их технологические возможности. Наличие такой методики позволит, с одной стороны, рационально назначать технические характеристики самоходных виброплит на этапе их проектирования, а с другой, выбирать режимы работы виброплиты для достижения требуемого коэффициента уплотнения грунта.

Собранные данные, касающиеся технологических возможностей самоходных виброплит, могут быть использованы при построении математической модели работы виброплиты и определения влияния технических характеристик виброплит на результат уплотнения грунта.

Список литературы

1. Тюремнов И.С., Новичихин А.А. Уплотнение грунтов вибрационными плитами. Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018, 143 с.
2. 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.
3. Sawant R. Advance Equipment for Compaction on Site // International Journal for Research in Engineering Application & Management. 2021. Vol. 6, N 12. P. 135-141. DOI: 10.35291/2454-9150.2021.0099.
4. Кузьмичев В.Д. Математическая модель виброплиты // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 65-68.
5. 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. DOI: 10.3390/app9020336.
6. 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. DOI:

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. 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.
3. Sawant R. Advance Equipment for Compaction on Site. *International Journal for Research in Engineering Application & Management*. 2021, Vol. 6, No. 12, pp. 135-141. DOI: 10.35291/2454-9150.2021.0099.
4. Kuzmichev V.D. Mathematical model of plate compactors. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*. 2012, No. 3, pp. 65-68. (In Russian)
5. 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. DOI: 10.3390/app9020336.
6. Wang C., Qiu T., Xiao M., Wang J. Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor versus Excavator-

10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

7. Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 3. С. 143.

8. 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.

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

10. Chen C., Hu Y., Jia F., Wang X. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network // Construction and Building Materials. 2022. DOI: 127583.10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.

11. Xu G., Chang G., Wang D., Correia A. Nazarian S. The pioneer of intelligent construction — An overview of the development of intelligent compaction // Journal of Road Engineering. 2022. DOI 10.1016/j.jreng.2022.12.001.

12. Fathi A., Tirado C., Rocha S., Mazari M., Nazarian S. Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements // Transportation Geotechnics. 2020. DOI 100509. 10.1016/j.trgeo.2020.100509.

13. Kaufmann K., Anderegg R. GPS-based Compaction Technology // Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance. 2008. P. 287-296.

14. Yao Y., Song E. B. Intelligent compaction methods and quality control // Smart Construction and Sustainable Cities. 2023. DOI: 1.10.1007/s44268-023-00004-4.

15. Chen C., Chang F., Li L., Dou W., Xu C. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression // Electronic Research Archive. 2023. DOI: 31. 2775-2792. 10.3934/era.2023140.

16. Anderegg R., Kaufmann K. Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors // GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age. 2006. DOI:

† Mounted Hydraulic Plate Compactor. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000284.

† 7. Ryabov G.K., Leonteva V.S., Fedoseev Yu.V. On the mechanics of movement of wheel-less plate compactor. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2012, No. 3, p. 143. (In Russian)

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

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

† 10. Chen C., Hu Y., Jia F., Wang X. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network. *Construction and Building Materials*. 2022. 341.

† DOI: 27583.10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.

† 11. Xu G., Chang G., Wang D., Correia A. Nazarian S. The pioneer of intelligent construction - An overview of the development of intelligent compaction. *Journal of Road Engineering*. 2022.

† DOI: 10.1016/j.jreng.2022.12.001.

† 12. Fathi A., Tirado C., Rocha S., Mazari M., Nazarian S. Assessing Depth of Influence of Intelligent Compaction Rollers by Integrating Laboratory Testing and Field Measurements. *Transportation Geotechnics*. 2020. DOI: 100509. 10.1016/j.trgeo.2020.100509.

† 13. Kaufmann K., Anderegg R. GPS-based Compaction Technology. *Proceedings of the 1st International Conference on Machine Control and Guidance*. 2008, pp. 287-296.

† 14. Yao Y., Song E. B. Intelligent compaction methods and quality control. *Smart Construction and Sustainable Cities*. 2023. DOI: 1.10.1007/s44268-023-00004-4.

† 15. Chen C., Chang F., Li L., Dou W., Xu C. Optimization of intelligent compaction based on finite element simulation and nonlinear multiple regression. *Electronic Research Archive*. 2023. DOI: 31. 2775-2792.

10.1061/40803(187)41.

17. Тюремнов И.С., Новичихин А.А., Филатов И.С. Обзор рекомендаций производителей по использованию вибрационных плит для уплотнения грунта // Механизация строительства. 2014. № 12. С. 28-32.

18. FoxWeld [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://foxweld.ru> (дата обращения 12.07.2024).

19. TREMIX. Soil and Asphalt Compaction. Tremix, Satra, Sweden. 2007. 12 p.

20. РентСтрой [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://rentstroy64.ru/content/files/catalog1/jeonil_jpc_80_wt_0.pdf?ysclid=lyiieqxqlci115204781 (дата обращения 12.07.2024).

21. Сплитстоун [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://splitstone.ru> (дата обращения 12.07.2024).

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

23. BOMAG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bomag.com> (дата обращения 12.07.2024).

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

25. Тюремнов И.С., Игнатъев А.А., Филатов И.С. Статистический анализ технических характеристик грунтовых вибрационных катков // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2014. № 3. С. 81-88.

26. Тюремнов И.С., Федорова Д.В. Обзор рекомендаций производителей по оценке технологических возможностей навесных экскаваторных виброплит при уплотнении грунтов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2020. Т. 17. № 5. С. 562-573. DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-5-562-573.

† 10.3934/era.2023140.

† 16. 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.

† 17. Tyuremnov I.S., Novichikhin A.A., Filatov I.S. The review on manufacturer recommendations for vibratory plates usage in soil compaction. *Mekhanizatsiya stroitel'stva*. 2014, No. 12, pp. 28-32. (In Russian)

† 18. FoxWeld. Available at: <https://foxweld.ru>

† 19. TREMIX. Soil and Asphalt Compaction. Tremix, Satra, Sweden. 2007. 12 p.

† 20. RentStroy. Available at: https://rentstroy64.ru/content/files/catalog1/jeonil_jpc_80_wt_0.pdf?ysclid=lyiieqxqlci115204781

† 21. Splitstone. Available at: <https://splitstone.com>

† 22. AMMANN. Available at: <https://www.ammann.com>

† 23. BOMAG. Available at: <https://www.bomag.com>

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

† 25. Tyuremnov I. S., Ignat'ev A.A., Filatov I.S. Statistical analysis of technical specification of soil vibratory rollers *Vestnik Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014, No. 3, pp. 81-88. (In Russian)

† 26. Tyuremnov I. S., Fedorova D.V. Review of manufacturers' recommendations on technological capabilities of ejectable excavator vibroplates assessment during soil compaction. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*. 2020, T. 17, No. 5, pp. 562-573, DOI: 10.26518/2071-7296-2020-17-5-562-573. (In Russian)