

### Выводы

1. Установлено, что прогиб вала и дисбаланс системы ротор — АБУ зависят от отношения массы жидкости к суммарной массе ротора, характеризующего жидкостное автобалансирующее устройство.
2. При внезапном переходе угловой скорости через критическую рассмотренное АБУ увеличивает

вибрацию ротора, а при изменении частоты вращения в закритической области — уменьшает, что подтверждается опытом эксплуатации АБУ.

3. Приведенные формулы позволяют вычислить предельное значение дисбаланса системы и минимизировать его при конструировании АБУ для роторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Епишев Л.В. О динамической неустойчивости вращающегося ротора при неполном наливе жидкости // Научные доклады высшей школы. Машиностроение и приборостроение. — 1959. — № 2. — С. 66–74.
2. Дерендяев Н.В., Сандалов В.М. Об устойчивости стационарного вращения цилиндра, частично заполненного вязкой несжимаемой жидкостью // Прикладная механика и математика. — 1982. — Т. 46, вып. 4. — С. 578–586.
3. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 246 с.

4. Рубановский В.Н., Самсонов В.А. Устойчивость стационарных движений в примерах и задачах. — М.: Наука, 1988. — 304 с.
5. Нестеренко В.П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. — Томск: Изд-во Томского ун-та, 1985. — 85 с.
6. Гусаров А.А. Автобалансирующие устройства прямого действия. — М.: Наука, 2002. — 119 с.
7. Андрейченко К.П. Динамика поплавковых гироскопов и акселерометров. — М.: Машиностроение, 1987. — 128 с.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.

УДК 621.833

## СОЗДАНИЕ РУЧНОЙ МАШИНЫ С ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

В.С. Коротков

Томский политехнический университет  
E-mail: kvs@tpu.ru

*Дано описание двух вариантов конструкции и техническая характеристика ручного электробурра, в приводе которого использован коллекторный электродвигатель с волновой передачей. Представлен метод автоматизированного выбора мощности двигателя. Приводятся результаты испытаний.*

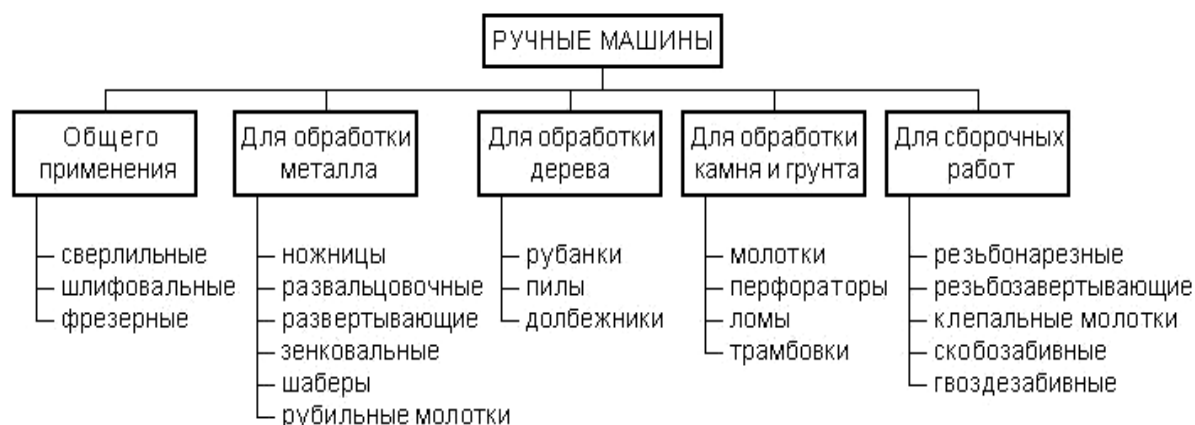
На современном этапе рыночная реформа требует обеспечить широкую гамму высокопроизводительного механизированного инструмента с высокими потребительскими свойствами. Интенсификация рабочих процессов сопровождается повышенными требованиями, предъявляемыми к новой технике. В данных условиях развития экономики отечественные разработки должны быть конкурентоспособными на мировом рынке и не уступать по своим техническим характеристикам зарубежным аналогам. В ручных машинах различных типов необходимо получить экономию энергии, снизить материалоемкость, повысить качество выполняемых работ и улучшить условия труда оператора. Исследования, направленные на создание ручной машины статического действия с высоким крутящим моментом на рабочем органе и на улучшение эксплуатационных характеристик ручных машин такого класса, являются актуальными для строительства и сельского хозяйства.

В настоящее время в классификации ручных машин по назначению и области применения, соответствующей действующему стандарту, нет ручной машины предназначенной для бурения грунтов (рис. 1) [1].

В строительстве и сельском хозяйстве существуют такие виды работ, которые требуют достаточно высокого крутящего момента на рабочем органе. Например, бурение ям под столбы ограждения, фундамент для мелких построек и эстакад, бурение шпуров для взрывных работ и проведения инженерных изысканий и т.п.

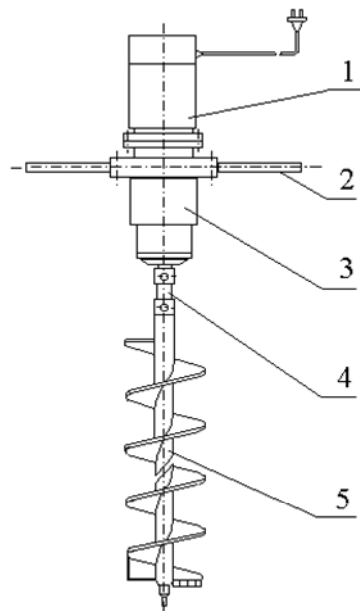
Поэтому с целью расширения номенклатуры выпускаемых ручных машин (РМ) разработана конструкция ручной машины электробур с волновой зубчатой передачей (ВЗП), предназначенной для бурения грунтов I-IV категории по классификации Госстроя (рис. 2) [2]. Совокупность существенных признаков устройства не известна из уровня техники [3].

Преимущественное распространение в приводах РМ (до 70 %) получили однофазные коллекторные двигатели с двойной изоляцией мощностью 60...2000 Вт, с частотой вращения якоря 200...300 с<sup>-1</sup>. Эти двигатели характеризуются высокой удельной мощностью на единицу массы, способностью выдерживать кратковременные перегрузки, нечувствительностью к колебаниям напряжения в питающей электросети, невысоким уровнем пускового тока (не бо-



**Рис. 1.** Классификация ручных машин по назначению и области применения

лее четырехкратного номинального значения). Они безопасны в эксплуатации, могут работать от сети переменного и постоянного тока, для их питания не требуется громоздких трансформаторов или преобразователей частоты [4].



**Рис. 2.** Электробур: 1) коллекторный двигатель; 2) рукоятки; 3) волновой редуктор; 4) муфта; 5) шнековый рабочий орган

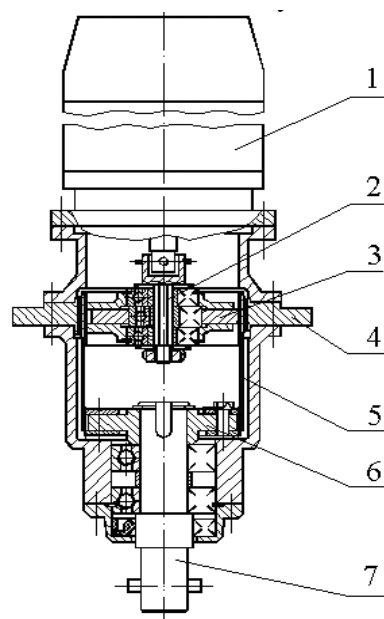
Одним из путей повышения надежности, уменьшения габаритных размеров и массы машин, а также снижения расходов на ее эксплуатацию является использование прогрессивных типов механических передач энергии от двигателя к исполнительному устройству. К таким типам передач относится, в частности, волновая зубчатая передача и волновая передача с промежуточными звеньями (ВППЗ).

ВЗП в диапазоне передаточных отношений 80...400 выполняется одноступенчатой и может конкурировать в отношении массы, габаритных размеров, простоты конструкции и КПД с лучшими образцами планетарных передач [5].

Основными достоинствами ВППЗ являются высокое передаточное отношение 6...60 в одной ступе-

ни. Редукторы с волновой передачей с промежуточными звеньями выдерживают многократные кратковременные перегрузки практически без упругих деформаций, имеют небольшие габариты и массу, высокий КПД в сравнении с зубчатыми редукторами других типов. За счет большой жесткости кинематических звеньев редукторов, общий угловой зазор составляет до  $0,5^\circ$  при нормальной точности изготовления [6].

На рис. 3 представлена конструкция привода РМ электробур. Вращательное движение якоря двигателя – 1 через соединительное устройство передается на вал дискового генератора – 2. Диски – 3, совершая плоскопараллельное движение относительно друг друга, приводят к эффекту обкатывания гибкого колеса – 5 по жесткому колесу – 4. Причем направление вращения якоря двигателя и гибкого колеса волновой передачи становится противоположно. Зубчатая муфта – 6 передает крутящий момент на шпindelь – 7.



**Рис. 3.** Конструкция привода РМ с ВЗП: 1) коллекторный двигатель; 2) вал генератора волн; 3) диски генератора волн; 4) жесткое колесо; 5) гибкое колесо; 6) зубчатая муфта; 7) шпindelь

Передаточное отношение волновой передачи данного типа определяется по зависимости [7]:

$$U = -\frac{z_2}{z_1 - z_2},$$

где  $z_1$  – число зубьев жесткого колеса;  $z_2$  – число зубьев гибкого колеса.

Благодаря многопарности зацепления (нагрузку могут передавать до 50 % всех пар зубьев) нагрузочная способность волновой передачи выше, чем планетарной.

Критериями работоспособности волновой зубчатой передачи являются: прочность гибкого колеса, прочность подшипников генератора, жесткость генератора и жесткого колеса, износ зубьев и тепловой режим [8].

Проверочные расчеты прочности гибкого колеса показали, что для обеспечения равнопрочности гибкого колеса ВЗП и коллекторного двигателя, ресурс которого составляет 500 ч, необходимо диаметр гибкого колеса определять по зависимости:

$$d = k_v c \sqrt[3]{\frac{T_p \psi}{[\tau]}}, \text{ мм}$$

где:  $k_v$  – коэффициент, учитывающий скорость изменения волны деформации;  $c$  – коэффициент, учитывающий влияние распределения нагрузки по зонам зацепления;  $T_p$  – рабочий момент на гибком колесе, Н·мм;  $[\tau]$  – допускаемые напряжения при кручении, МПа;  $\psi$  – отношение диаметра к толщине гибкого колеса.

Коэффициент  $k_v$  для волновой передачи электротрубы при диаметре гибкого колеса 80 мм имеет линейную зависимость в диапазоне частоты вращения волнообразователя 12000...18000 мин<sup>-1</sup>.

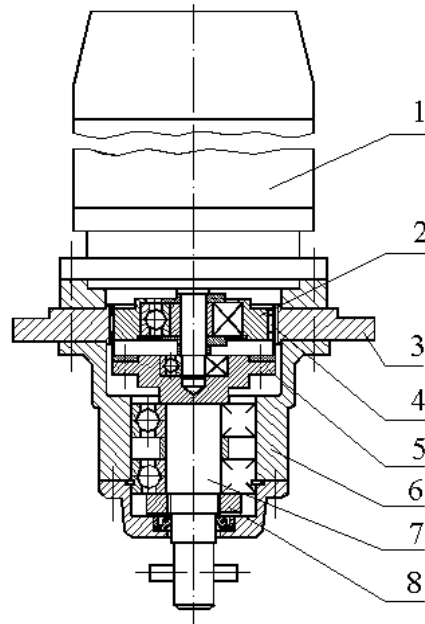
Конструкция ВЗП для коллекторного двигателя отличается новизной и имеет изобретательский уровень [9].

Для создания электротрубы с оптимальной частотой вращения рабочего органа 250...350 мин<sup>-1</sup>, позволяющего эффективно осуществлять рабочий процесс в грунтах с включениями гальки и гравия при небольшой массе и размерах машины, спроектирована конструкция привода с волновой передачей с промежуточными звеньями. В сравнении с ручной машиной электротрубы с ВЗП данное устройство имеет меньший габаритный размер в осевом направлении, за счет этого несколько снижена и общая масса РМ.

Техническая характеристика ручной машины электротрубы с ВЗП и ВППЗ представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Краткая техническая характеристика ручной машины электротрубы с волновой передачей:  $N_{об} = 0,75$  кВт;  $n_{об} = 15000$  мин<sup>-1</sup>

Привод	U	$n_{р.о.}$ , мин <sup>-1</sup>	$T_{р.о.}$ , Н·м	H, м	Масса, кг
с ВЗП	80	187	22	3	7,0
с ВППЗ	60	250	17	2	6,7



**Рис. 4.** Конструкция привода РМ с ВППЗ: 1) коллекторный двигатель; 2) диск генератора волн; 3) профильный венец; 4) промежуточные тела качения; 5) сепаратор; 6) корпус; 7) выходной вал; 8) гайка

С целью повышения производительности расчетов при создании новой техники и для прогнозирования расхода мощности двигателя на стадии эксплуатации создан метод автоматизированного выбора мощности двигателя ручной машины электротрубы в зависимости от известных или предполагаемых физико-механических свойств грунтов и вида рабочего органа (р.о.) [10].

Уравнения рабочего процесса при стремлении получить максимальную глубину бурения в случае, когда  $N_{об} = \text{const}$  можно записать в виде:

$$N_{об} = f(T1, T2, \eta, n); N_{об} = \frac{2\pi n(T1 + T2)}{\eta};$$

$$\begin{cases} f(H) \rightarrow \max; \\ f(\eta) \rightarrow \max. \end{cases}$$

где:  $N_{об}$  – мощность двигателя;  $H$  – глубина бурения;  $T1$  – момент, необходимый для разрушения грунта в забое;  $T2$  – момент, необходимый для подъема грунта на поверхность;  $n$  – частота вращения рабочего органа;  $\eta$  – КПД волнового редуктора.

Тогда:

$$\begin{cases} H = f(T2, D, \beta, \mu2) \rightarrow \max; \\ \eta = f(N_B, N_{об}) \rightarrow \max. \end{cases}$$

$$\begin{cases} H = \frac{T2 K_p}{0,125 \pi K1 D(D^2 - d^2) \psi \rho g (\text{tg} \beta + \mu2)}; \\ \eta = \frac{N_B}{N_{об}}; \end{cases}$$

где:  $N_B$  – мощность, затрачиваемая на процесс бурения;  $D$  – диаметр шнека;  $\beta$  – угол подъема винтовой линии шнека;  $\mu2$  – коэффициент трения

**Таблица 2.** Рекомендуемые эксплуатационные характеристики ручной машины электробур на базе коллекторного двигателя с полезной мощностью  $N_{дв}=750$  Вт в зависимости от типа разрабатываемого грунта

Тип грунта	Частота вращения р.о., мин <sup>-1</sup>	Плотность грунта, кг/м <sup>3</sup>	Диаметр шнека, мм	Толщина стружки, мм	Глубина бурения, м	К-т трения грунта по стали	К-т внеш. трения грунта по грунту	Осевое усилие, Н	Момент разрушения грунта, Н-м	Момент подъема грунта, Н-м	Производительность, м/ч
I – почва супесь	187	1200	200	4	0,35	0,45...0,5	0,6...0,75	323	19,19	3,79	0,75
	187	1400	160	5	1			323	16,64	6,24	0,93
	187	1400	120	10	1			485	18,32	3,20	1,87
	250	1400	100	12	1			485	15,60	1,58	2,25
II – суглинок	187	1400	120	6	2	0,5...0,6	0,75...0,85	459	16,84	6,05	1,12
	187	1600	100	8	3			500	16,34	6,30	1,50
	250	1600	100	6	3			383	11,27	6,01	1,50
	250	1600	100	7	2			446	14,37	2,68	1,75
III – крепкий суглинок глина	187	1600	120	4	2	0,6... 0,65	0,85...0,9	408	15,42	7,24	0,75
	187	1900	100	6	3			500	16,73	6,03	1,12
	250	1900	100	4	3			383	11,15	6,00	1,12
IV – крепкая глина	187	2200	100	4,5	3	0,65...0,7	0,9...0,95	478	14,98	7,34	0,84
	250	2200	100	3	3			319	9,94	7,10	0,75
	187	2500	76	6	5			485	16,44	6,18	1,12
	250	2500	76	6	5			485	11,70	5,87	1,50

$\eta=0,6$  – КПД волновой передачи при  $n_{дв}=15000$  мин<sup>-1</sup>;  
 $\beta=15^\circ$  – угол подъема винтовой линии шнека

грунта по грунту;  $K_p$  – коэффициент разрыхления грунта;  $K_1$  – коэффициент трения шнека о стенки скважины;  $\psi$  – коэффициент заполнения шнека;  $d$  – диаметр штанги;  $\rho$  – плотность грунта.

Момент разрушения грунта в забое  $T_1$  и момент подъема грунта на поверхности  $T_2$  выражаются аналитическими зависимостями [2]:

$$\begin{cases} T_1 = 62,5 D^2 \sigma_{II} h_c z_r (1 + \mu_1 K_3); \\ T_2 = 0,125 \pi K_1 D (D^2 - d^2) H \psi \rho K_p^{-1} g (\operatorname{tg} \beta + \mu_2); \end{cases}$$

где:  $\mu_1$  – трения грунта о сталь;  $h_c$  – толщина стружки;  $z_r$  – число кромок резания;  $\sigma_{II}$  – приведенная прочность грунта;  $K_3$  – коэффициент затупления инструмента.

При  $N_{дв}=\text{const}$ ;  $n=n_{опт}$ :  $T_1+T_2=\text{const}$ .

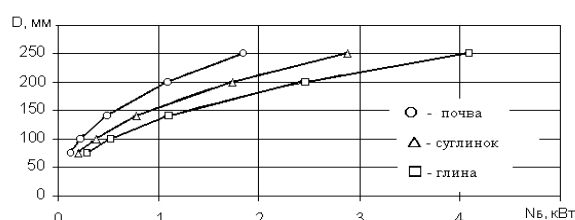
Тогда для достижения цели необходимо иметь:

$$\frac{T_2}{T_1} \rightarrow \max; \begin{cases} T_2 \rightarrow \max; \\ T_1 \rightarrow \min. \end{cases}$$

Максимальную глубину бурения получаем в случае, когда следующие величины стремятся принять минимально возможные значения:

$$\begin{cases} (h_c, z_r, D, \sigma_{II}, \mu_1, K_3) \rightarrow \min; \\ (\rho, \beta, \mu_2, K_p, K_1, \psi) \rightarrow \min. \end{cases}$$

На основе представленных зависимостей разработан алгоритм решения задачи по определению мощности двигателя РМ электробур и написана программа расчета в среде программирования Delphi 4. По результатам расчета построены зависимости, характеризующие влияние различных факторов на рабочий процесс механизма. Некоторые из них представлены на рис. 5. Рекомендуемые эксплуатационные характеристики РМ сведены в табл. 2.



**Рис. 5.** Зависимость мощности двигателя от диаметра шнека при глубине бурения  $H=1$  м (толщина стружки  $h_c=5$  мм)

На базе коллекторного двигателя с полезной мощностью 0,75 кВт изготовлен экспериментальный образец привода с волновой зубчатой передачей с передаточным отношением  $U=80$ , который прошел стендовые испытания.

В ходе испытаний привод подтвердил свою работоспособность. Шумовая и вибрационная характеристики соответствуют существующим стандартам и приводятся в табл. 3.

**Таблица 3.** Уровни звукового давления и виброскорости РМ на среднегеометрических частотах октавных полос

Уровень, дБ	Частота, Гц							
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000
Допустимый уровень звукового давления по ГОСТ 12.2.030-83	-	107	100	94	91	92	92	94
Фактический	-	70	68	75	90	89	92	94
Допустимый уровень виброскорости по СН 3041-84	117	114	111	109	105	102	-	-
Фактический	97	85	98	109	98	89	-	-

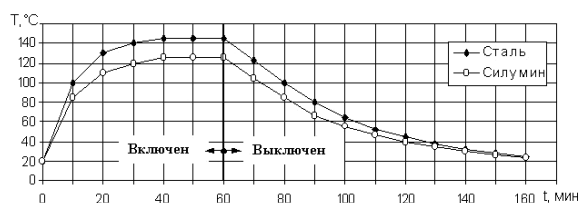


Рис. 6. Динамика изменения температуры материала корпуса привода

Тепловая характеристика привода исследована на стенде при номинальной нагрузке. После наступления теплового баланса, привод отключался от сети переменного тока, и фиксировалась динамика охлаждения механизма, рис. 6.

В качестве смазывающего материала рекомендуется использовать жидкое моторное масло М-5, М-8, М-10 с противоизносными присадками или пластичную термостойкую ( $-50...180$  °C) комплексную кальциевую смазку ВНИИНП-207, ЦИАТИМ-221 ( $-60...150$  °C) и т.п.

Результаты, полученные при стендовых испытаниях, подтверждают работоспособность привода для ручной машины электробур на базе коллекторного двигателя с волновой зубчатой передачей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 16436-70. Машины ручные пневматические и электрические. Термины и определения. – М., 1971.
- Машины для земляных работ / Д.П. Волков, В.Я. Крикун, П.Е. Тотолин и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.
- СПМ 4995 Россия. МПК<sup>7</sup> F16H 1/00. Электробур с волновым редуктором / В.С. Коротков. – № 95122179/20; Заявлено 05.12.95; Публ. 16.09.97, Бюл. № 9.
- Справочник по электрическим машинам: В 2 т. / Под ред. Б.К. Клокова, И.П. Копылова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 2. – 1989. – 688 с.
- Волков Д.П., Крайнев А.Ф. и др. Волновые зубчатые передачи. – Киев: Техника, 1976. – 222 с.
- Панкратов Э.Н. Проектирование механических систем автоматизированных комплексов для механообрабатывающего производства: Практикум лидера-проектировщика. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. – 295 с.
- Крайнев А.Ф. Детали машин. Словарь-справочник. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
- Иванов М.Н., Финогенов В.А. Волновые передачи (рекомендации по инженерным расчетам). – М.: НИИмаш, 1982. – 80 с.
- Пат. 2134827 Россия. МПК<sup>7</sup> F16H 1/00. Волновая передача для коллекторного двигателя / В.С. Коротков. – № 97120085/28; Заявлено 28.11.97; Публ. 20.08.99, Бюл. № 23.
- Коротков В.С., Мартынов А.К., Панкратов Э.Н. Автоматизированный метод расчета мощности двигателя ручной машины электробур // Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов. – Томск: ТГУ, 2002. – Вып. 4. – С. 127–135.
- Коротков В.С. Создание и исследование работоспособности ручной машины с волновой передачей: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04. – Томск, 2003. – 133 с.
- www.icentr.com; www.temz.tomsk.ru.

Привод РМ с волновой передачей имеет небольшую массу (табл. 1) и по этому показателю может конкурировать с почвенным мотобуром ВТ-106 немецкой фирмы STIHL. Экономический эффект при производстве небольших по объему строительных работ в сравнении с отечественным мотобуром М-10 составляет 10 тыс. р. за срок службы [11]. Электросверло горное переносное ЭР14Д-2М, выпускаемое Томским электромеханическим заводом, создано на базе двигателя мощностью 1 кВт и имеет массу 16,5 кг при частоте вращения шпинделя  $14,3$  с<sup>-1</sup> [12]. Такая частота вращения рабочего органа не является оптимальной при прохождении грунтов I-IV категории шнековым способом бурения. Масса горного сверла данного типа превышает массу привода электробура с волновым редуктором более чем в 2 раза. Поэтому для проведения небольших объемов работ в пожаробезопасной среде рекомендуется использовать РМ с волновой передачей. В классификации ручных строительных машин по назначению и области применения, соответствующей ГОСТ 16436-70, такую машину можно отнести к машинам для обработки камня и грунта, дополнив классификацию новым видом ручной строительной машины – бур.