DOI: 10.26730/1999-4125-2021-1-87-96

УДК 622.691.4:053:533.6(252.6)

ПРОГРЕССИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОВШЕЙ АКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ ЗЕМЛЕРОЙНЫХ МАШИН

THE PROGRESSIVE STRUCTURE OF THE LADLES OF ACTIVE ACTION FOR EARTH MOVING MACHINES

Либерман Яков Львович [1],
канд. техн. наук, доцент, e-mail: Yakov_Liberman@List.ru
Yakov L. Liberman [1], C. Sc. in Engineering, associate Professor
Горбунова Любовь Николаевна [2],
канд. техн. наук, доцент, e-mail: Lubov202055@yandex.ru
Lyubov' N. Gorbunova [2], C. Sc. in Engineering, associate Professor
Летнев Константин Юрьевич [1],
инженер, e-mail: k.y.letnev@urfu.ru
Konstantin Yu. Letnev [1], engineer

[1]Уральский Федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
[1]Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Russia, Yekaterinburg, ul. Mira, 19
[2]Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.
[2]Siberian Federal University, 79/10, pr. Svobodniy, Krasnoyarsk, 660041.

Аннотация:

В статье отмечено, что при копании мерзлых и иных твердых грунтов применяются землеройные машины с ковшами активного действия, которые наряду со своей основной функцией – резания грунта с отделением стружки, подъема и отвала ее – облегчают эту функцию, т.е. размягчают грунт, облегчая его рыхление и дробление. Рассмотрены типичные конструкции ковшей активного действия и отмечено, что снабжение ковшей специальными конструктивными элементами (рыхлителями, ударниками и др.) усложняет их конструкцию, однако при правильном их применении расширяются технологические возможности землеройных машин и повышается производительность земляных работ. В статье разграничены современные области применения ковшей активного действия. Производственный опыт показывает, что ковши с рыхлителями предназначены для разработки грунтов средней прочности, а для разработки крепких трещиноватых горных и им подобных пород, имеющих прочность порядка 80 МПа, эффективнее использовать ковши активного действия, оснащенные разного типа ударниками (пневматические, гидравлические, магнитострикционные и др.). Высокий уровень шума, значительное энергопотребление и невозможность перенастройки закона движения пневматического ударника являются основными недостатками ковшей. Этих недостатков в определенной степени лишены ковши активного действия с гидравлическими и магнитострикционными ударниками. Для повышения долговечности ковшей они могут быть снабжены элементами снижения трения, например, износостойкими покрытиями.

В настоящее время можно выделить два перспективных направления развития прогрессивных конструкций ковшей активного действия: их специализацию и универсализацию. Первое преследует цель повышения эффективности экскавации вполне определенных грунтов, второе – разнообразных грунтов, обладающих принципиально различными свойствами.

Ключевые слова: *экскаватор, ковш активного действия, зубья, ударник, грунт, рыхлитель, вибрация.*

Abstract:

The article notes that when digging frozen and other solid soils, earthmoving machines with active buckets are used, which, along with their main function – cutting the soil with the separation of chips, lifting and dumping it, facilitate this function – soften the soil, its loosening and crushing. Typical design variants of active-action

buckets are considered and it is noted that the supply of buckets with special structural elements (rippers, strikers, etc.) complicates their design, but with their proper use, the technological capabilities of earthmoving machines expand, and the productivity of earthmoving works increases. The article delineates the modern areas of application of active buckets. Production experience shows that buckets with rippers are designed for the development of medium-strength soils, and for the development of strong fractured rocks and similar rocks with a strength of about 80 MPa, it is more effective to use active buckets equipped with different types of strikers (pneumatic, hydraulic, magnetostrictive, etc.). It is shown that high noise, significant energy consumption and the inability to reconfigure the law of motion of the pneumatic striker are the main disadvantages of buckets. It is noted that these disadvantages are to a certain extent devoid of active buckets with hydraulic and magnetostrictive strikers. To increase the durability of the buckets, they can be equipped with friction-reducing elements, for example, a wear-resistant coating.

Currently, there are two promising directions for the development of progressive designs of active buckets: their specialization and universalization.

The first is aimed at improving the efficiency of excavating well-defined soils, the second-a variety of soils with fundamentally different properties.

Key words: *excavator, active bucket, teeth, striker, soil, ripper, vibration.*

В последние десятилетия при копании мерзлых и иных твердых грунтов все чаще используются землеройные машины с ковшами активного действия. Указанные ковши помимо своей основной функции – резания грунта с отделением стружки, подъема и отвала последней – реализуют еще и дополнительные функции, облегчающие выполнение основной: размягчение грунта, его рыхление или дробление. Для осуществления дополнительных функций ковши снабжаются специальными конструктивными элементами и, разумеется, усложняются, однако это расширяет их технологические возможности и при грамотном их применении повышает производительность земляных работ.

Рассмотрим некоторые типичные конструкции ковшей активного действия и разграничим современные области их применения.

Одними из первых являются такие ковши с перфорированными днищами и стенками, через отверстия в которых подается сжатый воздух [1]. Они разработаны в Московском автомобильно-дорожном техническом университете и предназначены для использования при строительстве транспортных магистралей в условиях Севера. В их состав входит компрессор, а иногда и устройство подогрева воздуха. При копании грунт в них в некоторой степени размягчается, но главным образом их эффективность определяется уменьшением трения грунта о поверхности ковша и снижением затрат энергии на деформации сдвига внутри грунта.

С целью дальнейшего повышения эффективности сконструировали ковши с пустотелым дном, через которые пропускается горячий газ, являющийся продуктом сгорания воздушно-керосиновой смеси в специальной камере [2]. Газ нагревает дно и выходит между зубьями ковша через сопла – отверстия, направленные в сторону копания грунта.

Сопла, через которые подается рабочий агент (газ или жидкость) в зону взаимодействия ковша с грунтом, применяются в ковшах активного действия довольно часто и представляют собой не только простые отверстия, но иногда и самостоятельные конструктивные элементы. Так, фирмой «М.А.Н. Машиненфабрик Аугсбург-Нюрнберг АГ» предложено их выполнять в виде вставок в дно и в боковые стенки ковша, причем часть из них закрепляют неподвижно, а часть – с возможностью качания [3]. Диаметр выходных отверстий сопел – 0,5-2 мм и служат они для подачи воды от насоса высокого давления (500-1000 бар и более). Ковш снабжен не зубьями, а режущими лезвиями, и струи воды из сопел образуют своеобразные «иглы», совокупное действие которых опережает действие лезвий по всей длине каждого из них. Во избежание замерзания воды в процессе эксплуатации ковша при низких температурах в нее добавляют антифриз, а трубопроводы, соединяющие насос с соплами, обеспечивают теплоизоляцией и в ряде случаев подогревают. Для усиления воздействия воды на грунт в нее вводят полимеры с длинными цепными молекулами. Применение полимеров осуществляют с помощью управляемого дозатора, расположенного перед насосом высокого давления.

Как показывает производственный опыт, ковши, подобные описанным выше, можно применять успешно при копании мерзлых супесей и суглинков при температурах до -14 ºС [4]. Они переводят копаемые грунты из категории мерзлых в категорию талых, превращают их в глинистое тесто, уменьшают их липкость. Если же требуется разрабатывать мерзлые суглинки при температурах ниже -14 ºС, глинистые грунты с низкой влажностью и содержащие плотные конгломераты, то более целесообразно использовать ковши активного действия с механическими элементами – рыхлителями. На рис. 1 показан рабочий орган роторного экскаватора с такими ковшами, сконструированный на кафедре «Подъемно-транспортные машины и роботы» Уральского

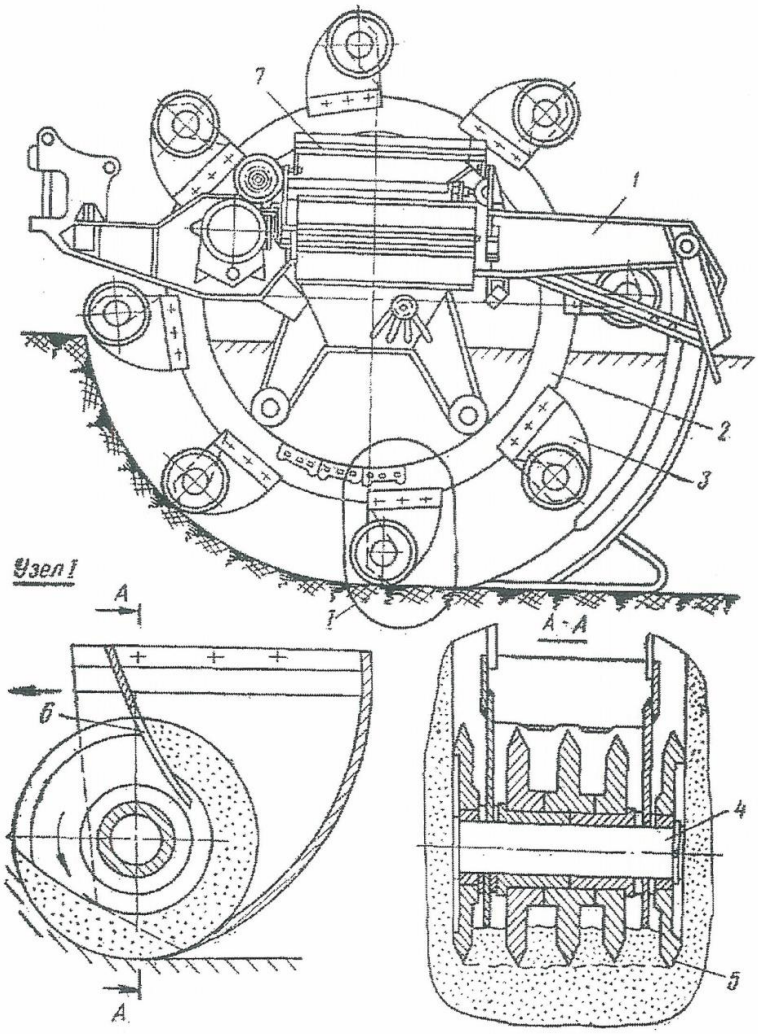


Рис. 1. Рабочий орган роторного экскаватора с ковшами, оснащенными рыхлителями
Fig. 1. Working body of a bucket wheel excavator with buckets, equipped with rippers

федерального университета [5, 6]. Он включает в себя раму 1 и ротор 2 с ковшами 3. На боковых стенках ковшей закреплены оси 4, на которых установлены режущие элементы в виде дисковых ножей 5, имеющих клиновидный обод. Чтобы включить в работу боковые стенки ковшей, ножи на осях 4 установлены и за их пределами, а для предотвращения зажатия грунта между ножами в промежутках между ними размещены выталкиватели 6. При работе экскаватора дисковые ножи внедряются в грунт от усилия подачи и вращаются в направлении, противоположном вращению ротора, разрезая грунт. Врезаясь в грунт и захватывая его, они разрыхляют его, он оказывает меньшее сопротивление движению относительно стенок и дна ковша и легче его заполняет. Наряду с этим ножи обеспечивают более высокую долговечность ковшей, чем зубья, поскольку при их вращении их режущие лезвия непрерывно обновляются.

В отличие от ковшей с рыхлителями, предназначенных для разработки грунтов средней прочности, для разработки крепких трещиноватых горных и им подобных пород, имеющих прочность порядка 80 МПа, применяют ковши активного действия, оснащенные разного типа ударниками. Наиболее распространены ковши с пневматическими ударниками, аналогичные изображенному на рис. 2, конструкции ПКБ Главстроймеханизации Минтрансстроя (ныне кампания «Трансстрой»).

Корпус этого ковша [4] состоит из двух боковых поясов (правого 1 и левого 18), соединенных друг с другом трубой 2. В нижней части ковша 14 имеется полость для установки ударников. К трубе 2 приварены проушины для присоединения ковша к ротору экскаватора, состоящие из листов 3, бобышек 4 и ребер 5. Задняя стенка ковша состоит из листов 7 и 8, образующих каналы для подвода сжатого воздуха к

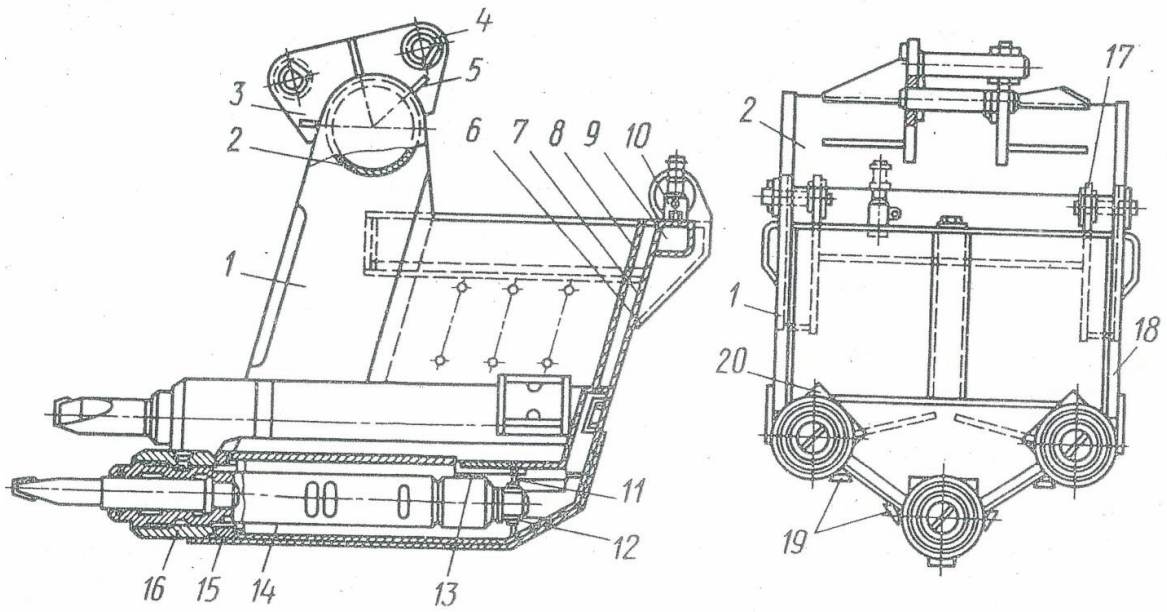


Рис. 2. Конструкция ковша с пневматическим ударником
Fig. 2. Bucket design with pneumatic hammer

Таблица 1. Показатели пневмоударников
Table 1. Indicators of hammers

Показатель	МК-4	МК-5	МК-6	МК-8
Энергия удара, кДж	1,0	1,25	1,50	1,85
Частота ударов в минуту	570	440	395	360
Масса ударника, кг	23,6	27,0	70,0	63,4
Ударная мощность, кВт	9,34	9,9	10,1	10,9
Рабочее давление сжатого воздуха, МПа	0,6	0,6	0,6	0,6
Подача компрессора, $м^3$/мин, не менее	9	9	9	9

пневмоударникам и сброса отработанного воздуха в атмосферу. В верхней части задней стенки ковша размещен воздушный коллектор 9 с патрубком 10 для подсоединения пневмопровода. К коллектору приварены проушины 17 с распорками 6. Ударники установлены в гильзах. В передней части каждой гильзы приварена втулка 15 с обоймой 16 ударника. На гильзах закреплены пластины 19 и 20, увеличивающие жесткость конструкции. В листе 11 в нижней части ковша имеются направляющие 12, куда входят патрубки ударников. Для обслуживания последних предусмотрены съемные стенки 13.

В настоящее время рядом отечественных предприятий выпускаются ковши с пневмоударниками МК-4, МК-5, МК-6, МК-8, показатели которых приведены в таблице.

Создаются и новые конструкции подобных ковшей [7], однако всем им присущи общие недостатки. Основные и них – высокий уровень шума, значительное энергопотребление и невозможность перенастройки закона движения ударника. Этих недостатков в определенной степени лишены ковши с магнитострикционными и гидравлическими ударниками.

Конструктивная схема ковша с магнитострикционным ударником, предложенная в Санкт-Петербургском архитектурно-строительном университете [8], приведена на рис. 3, *а*. Так же, как и пневмоударник, в этом ковше 1 ударник 2 установлен на дне ковша. Он включает в себя стержень 3 с зубом 4, волновод 5, припаянный к сердечнику 6, изготовленному в виде набора никелевых полос, и обмотку возбуждения 7. Для упрощения монтажа ударник установлен в разъемном корпусе 8 и закреплен в нем с помощью кольцевого бурта 9 и крышки 10, состоящей из двух половин. В корпусе имеются два полукольцевых выступа 11, на которые опирается сердечник 6 через антифрикционные прокладки 12. Со стороны, противоположной зубу 4, ударник закрыт крышкой 13, в которой расположены электроразъем 14 и штуцер 15 для подвода охлаждающей жидкости от коллектора 16, соединенного с внешней гидромагистралью, огражденной защитным козырьком 17.

При эксплуатации экскаватора в обмотку 7 подается переменное напряжение, длина сердечника 6 периодически изменяется, и зуб 4 вибрирует, дробя копаемую породу. Процесс

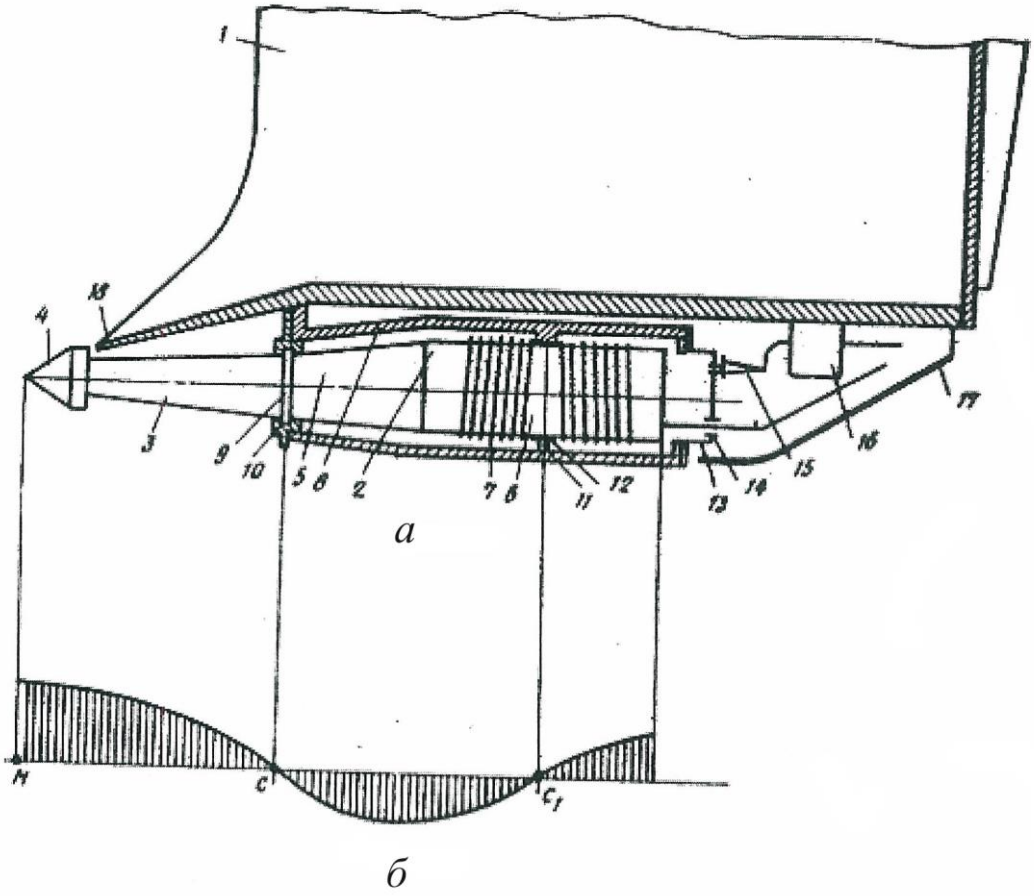


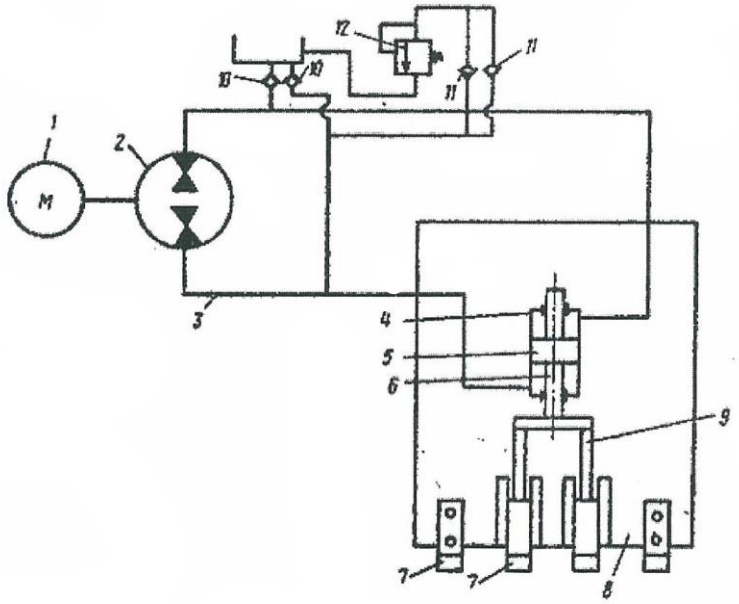
Рис. 3. Ковш с зубьями, вибрирующими от магнитострикторa
Fig. 3. Bucket with teeth vibrating from a magnetostrictor

вибрации сопровождается возникновением стоячей волны переменной амплитуды. Ее параметры выбраны так, чтобы режущая кромка зуба находилась в зоне максимальной амплитуды, а ее нулевые значения соответствовали расположениям крышки 10 и выступов 11 (рис. 3, *б*). Это предотвращает передачу колебаний на корпус ковша и делает его работу более надежной и экономичной, чем ковшей с пневмоударниками. Вместе с тем такой недостаток, как невозможность перенастройки закона движения ударника, у ковша с магнитострикционным ударником остается. Он отсутствует у ковша с гидроприводом, разработанным в Самаркандском архитектурно-строительном институте [9] и описываемом ниже.

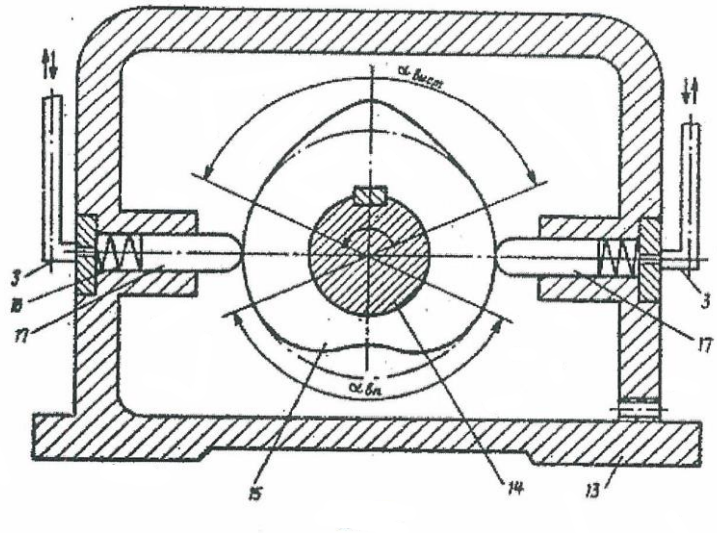
Гидропривод (рис. 4, *а*) содержит двигатель 1 и гидронасос 2 специальной конструкции, соединенный трубопроводами 3 с цилиндром – возбудителем 4. Поршень 5 цилиндра через шток 6 соединен с зубьями 7 ковша 8 посредством жестких стержней 9. Для подпитки гидропривода на случай утечек в него через обратные клапаны 10 включен гидробак. Для защиты от перегрузок имеются обратные клапаны 11 и предохранительный клапан 12.

Конструктивная схема гидронасоса 2 показана на рис. 4, *б*. Ее специфическим элементом является установленный внутри корпуса 13 вал 14 с эксцентриком 15. Профиль эксцентрика выполнен в виде «сердечка» и выбран так, чтобы контактирующие с ним под действием пружин 16 поршни 17 при его вращении нагнетали жидкость по трубопроводам 3 в определенном порядке. Последний обеспечивает периодический закон подачи жидкости в гидроцилиндр 4 и, соответственно, периодический закон движения стержней 9 и зубьев 7 ковша. Эксцентрик 15 сделан сменным и, заменяя его тем или иным (с той или иной геометрией), закон движения зубьев 7 можно перенастраивать.

Это наглядно иллюстрируется рис. 5, где A – текущее перемещение ковша X со скоростью V = 0,2 м/с, a = 0,006 м – амплитуда и T = 0,03 с – период колебаний зубьев 7, B – закон их движения при $\alpha_{ВЫСТ}$ эксцентрика, равном 20°, C – закон движения при $\alpha_{ВЫСТ}$ = 180°, D – закон равномерного движения.



а



б

Рис. 4. Гидропривод вибрирующих зубьев ковша:
а – гидросхема; б – конструктивная схема насоса
Fig. 4. Hydraulic drive of vibrating bucket teeth:
a – hydraulic circuit; b – structural diagram of the pump

Каждому из этих законов соответствует свое время врезания $t_{ВР}$ зубьев в грунт. Для закона B $t_{ВР} = t_B = 0{,}0015$ с, для закона C $t_{ВР} = t_C = 0{,}005$ с, а для закона D $t_{ВР} = t_D = 0{,}007$ с. При копании одних грунтов целесообразно обеспечивать одно $t_{ВР}$, при других – другое, что позволяет использовать экскаватор более эффективно, чем машины с ковшами, оснащенными ударниками, сконструированными ранее. Обусловлено это тем, что тяговая сила Q, прилагаемая к ковшу, согласно закону сохранения импульса сил [10-13] при разных сопротивлениях грунта разрушению P зависит от $t_{ВР}$ как

$$Q \approx P \cdot t_{ВР}/T,$$

где T – период колебаний ударника.

Рационально выбирая $t_{ВР}$, можно сокращать требуемые величины Q.

С расширением промышленного производства компактных приводных устройств, в частности электродвигателей с печатным ротором и им подобных, начали появляться и ковши с ударниками, работающими от таких двигателей.

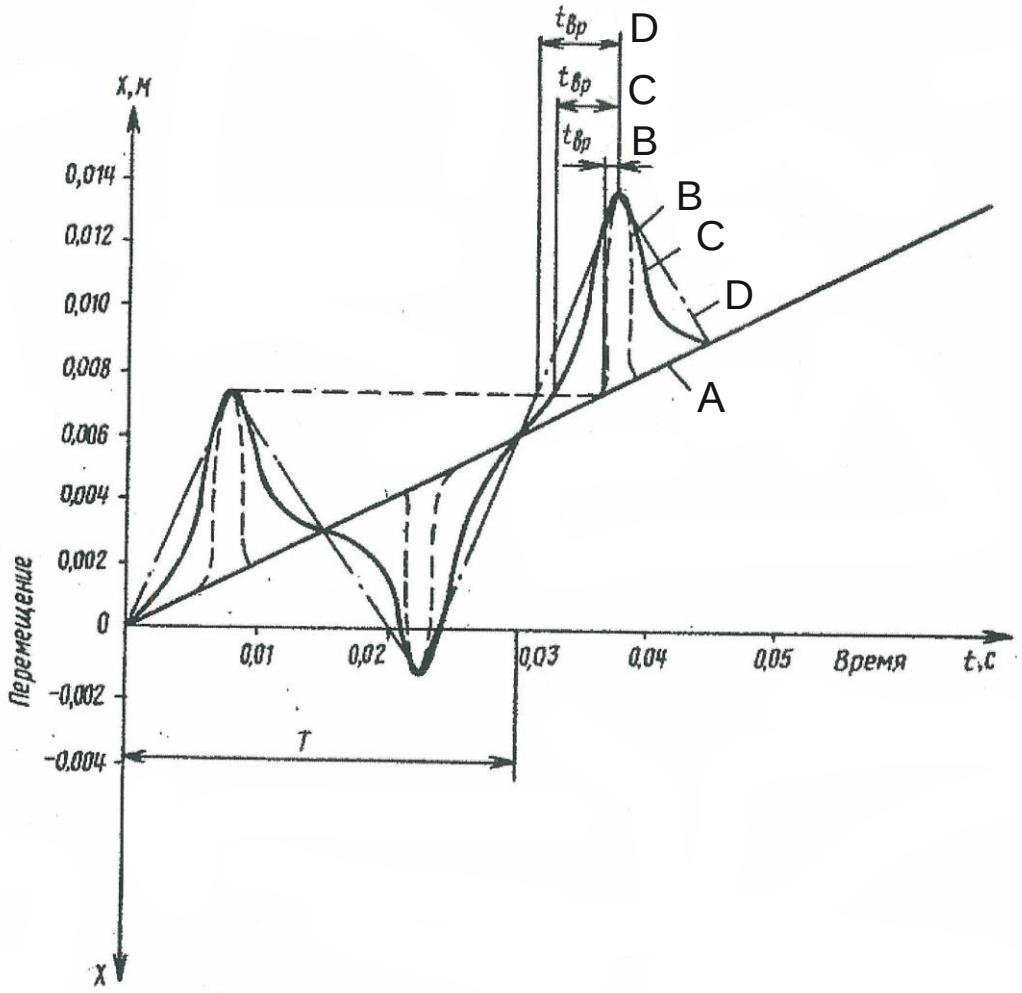


Рис. 5. Иллюстрация закона движения зубьев ковша
Fig. 5. Illustration of the law of motion of the bucket teeth

Схема одного из них, предложенная на кафедре «Подъемно-транспортные машины и роботы» Уральского федерального университета, показана на рис. 6.

Указанный ковш [14] включает в себя днище 1, заднюю 2 и боковые 3 стенки и зубья 4, жестко закрепленные на стержнях 5, установленных на днище 1 параллельно боковым стенкам в опорах продольного скольжения 6 с возможностью осевой вибрации.

Он снабжен кулачковым валом 7, закрепленным на днище 1 и в боковых стенках 3 в опорах вращения 8 (опора вала на днище условно не показана), приводом вращения 9, кинематически связанным с валом 7. Каждый стержень 5 выполнен с выступом 10, взаимодействующим с одним из кулачков 11 вала, и снабжен пружиной 12, одним концом опирающейся на заднюю стенку 2, а другим – на поверхность стержня 5, перпендикулярную его оси, при этом профиль кулачка 11 выполнен в виде архимедовой спирали.

Привод 9 представляет собой плоский регулируемый электродвигатель (типа велосипедного мотор-колеса), соединенный с валом 7 напрямую. Для того, чтобы защитить стержни 5 и сопряженные с ними элементы, установленные на днище 1 ковша, ковш снабжен дополнительным дном 13. При необходимости могут быть установлены с торцов приводов 9 защитные щитки.

В процессе эксплуатации ковша, привод 9 вращает вал 7 по часовой стрелке. Кулачки 11 воздействуют на выступы 10, заставляют стержни 5 плавно перемещаться в сторону задней стенки 2 ковша, сжимая пружины 12. Совершив оборот, кулачки 11 освобождают от нажатия выступы 10 и стержни под действием пружин 12 резко перемещаются сами и со связанными с ними зубьями 4 в направлении грунта. Движение зубьев происходит по пилообразному закону.

Диапазон вибрации определяется профилем кулачков 11, а энергия удара Э – пружиной 12:

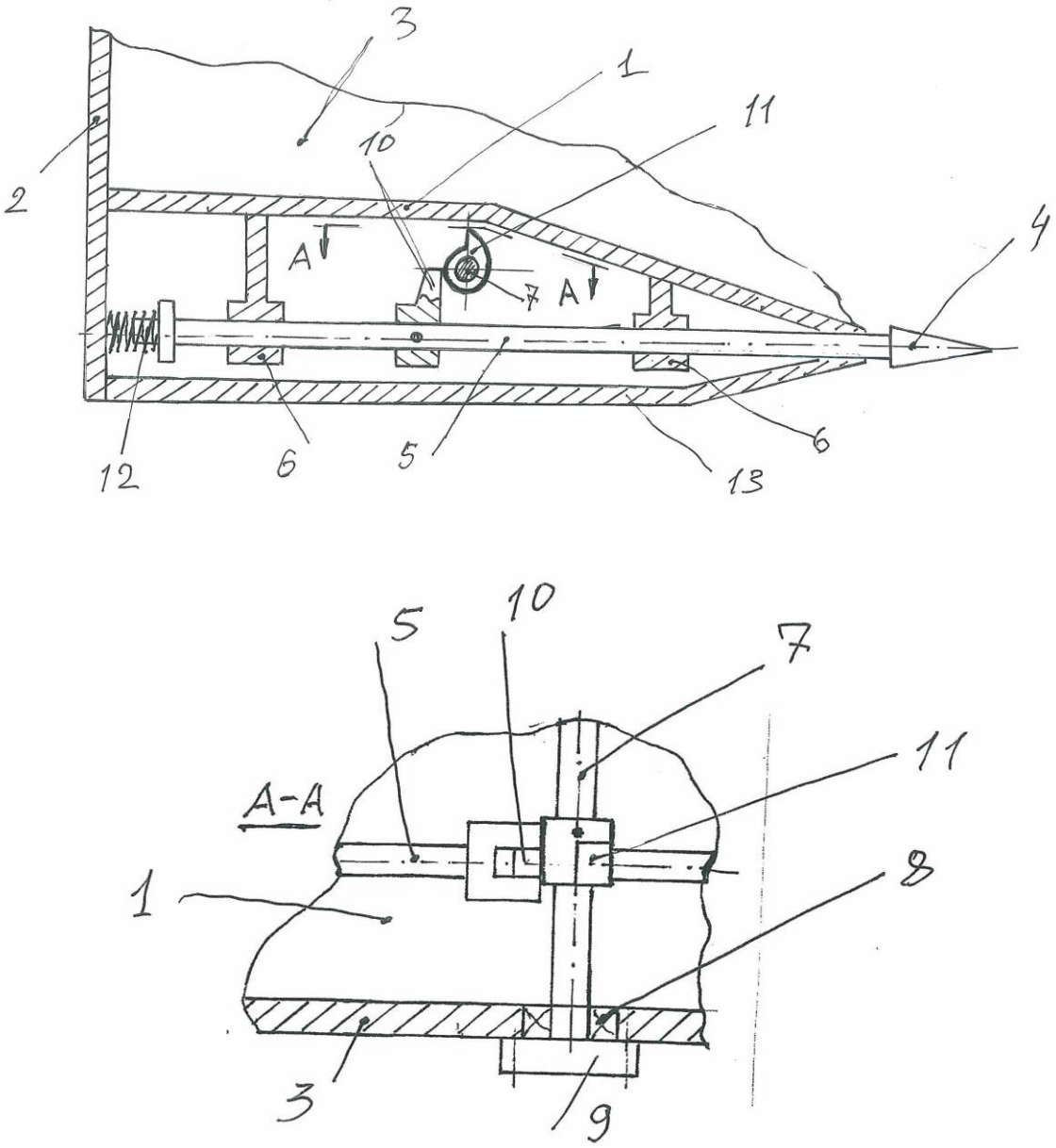


Рис. 6. Конструктивная схема ковша с электромеханическим кулачковым приводом
Fig. 6. Structural diagram of the bucket with electromechanical cam drive

$$Э = (1/2\ m)\ q^2 \cdot \ell^2 \cdot t^2,$$

где m – масса стержня с зубом; q – жесткость пружины; ℓ – деформация пружины кулачком; t – время перемещения зубьев в направлении грунта.

Частота ударов определяется скоростью вращения привода 9.

Ковши с ударниками, построенными по предложенной схеме, практически могут быть реализованы как в описанном виде, так и в усовершенствованном. Последнее осуществимо по-разному. Для регулирования энергии удара, например, на стержни 5 могут устанавливаться сменные кольца – грузы. В полость между основным 1 и дополнительным 13 днищами ковша может подаваться горячий газ, например, выхлопной газ дизеля тягача экскаватора (его температура, как известно, достигает 400-500°С). Впрочем, сегодня существуют многообразные конструктивные варианты и других описанных выше ковшей [15]. Возможны и иные варианты дальнейшего развития рассмотренной

Таблица. 2. Результаты численного эксперимента
Table. 2. Results of numerical experiment

Значение параметра Relevance	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа	Эквивалентные деформации, 10^4 м/м
0	187,9	9,3949
40	187,01	9,3504
60	187,009	9,3499
80	187,008	9,3496
100	187,008	9,3495

конструкции ковшей активного действия.

Для повышения долговечности ковша он может быть снабжен элементами снижения трения в зоне контакта выступов 10 и кулачков 11, например, износостойким покрытием.

В настоящее время можно выделить два перспективных направления их развития: специализация и универсализация ковшей. Первое преследует цель повышения эффективности экскавации вполне определенных грунтов, второе – разнообразных грунтов, обладающих принципиально различными свойствами. Каждому из них принадлежит будущее, или они и тогда останутся перспективными вместе, – покажет время и государственная стратегия районирования земляных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баловнев В.И., Ермилов А.Б., Хмара Л.А. Рабочий орган роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 641035.

2. Боженов Е.П., Гаврилова А.И., Иванов А.И., Плугин А.И. Рабочее оборудование роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 485223.

3. Хартмут Гратхофф. Рабочий орган роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 1386035.

4. Федоров Д.И. Рабочие органы землеройных машин. М.: Машиностроение, 1989.

5. Абрамов Б.Н. Рабочий орган роторного экскаватора / Авторское свидетельство СССР № 340743.

6. Абрамов Б.Н., Лукашук О.А. Многоковшовые экскаваторы: проектирование и расчет. Екатеринбург: УрФУ, 2012.

7. Бурый Г.Г., Щербаков В.С. Совершенствование конструкции ковша гидравлического экскаватора // Вестник СибАДИ, 2019, том 16, № 3, с. 203-213.

8. Карпов В.В., Темнов В.И., Бирючев Б.Н., Шапиро М.С., Кригер С.Д. Ковш экскаватора с вибрирующими зубьями / Авторское свидетельство СССР № 611975.

9. Польский С.Б., Левин Р.В., Круглов И.К. Гидравлический привод вибрационных зубьев экскаваторного ковша / Авторское свидетельство СССР № 1180462.

10. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. М.: Наука, 1977.

11. Скобелев С.Б. Схемы нагружения ковшей в процессе копания // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, 2019, том 16, № 3, с. 202-204.

12. Иванов Р.А., Федулов А.И. Методика расчета ковша активного действия // Строительные и дорожные машины, 2005, № 5, с. 28-31.

13. Тарасов В.Н., Коваленко М.В. Механика копания грунтов, основанная на теории предельных касательных напряжений // Строительные и дорожные машины, 2003, № 7, с. 38-43.

14. Пат. 194752 Российская Федерация, МПК E02F 3/40. Ковш землеройной машины / Я. Л. Либерман, К. Ю. Летнев (Россия) – № 2019120419; Заявлено 01.07.2019; Опубл. 23.12. 2019.

15. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Обеспечение энергоэффективности разработки грунта за счет оптимизации углов позиционирования рабочего оборудования экскаватора // Строительные и дорожные машины, 2015, № 3, с. 44–47.

REFERENCES

1. Balovnev V.I., Ermilov A.B., Hmara L.A. Rabochij organ rotornogo ekskavatora / Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 641035.

2. Bozhenov E.P., Gavrilova A.I., Ivanov A. I., Plugin A.I. Rabochee oborudovanie rotornogo ekskavatora / Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 485223.

3. Hartmut Grathoff. Rabochij organ rotornogo ekskavatora / Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1386035.

4. Fedorov D.I. Rabochie organy zemlerojnyh mashin. M.: Mashinostroenie, 1989.

5. Abramov B.N. Rabochij organ rotornogo ekskavatora / Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 340743.

6. Abramov B.N., Lukashuk O.A. Mnogokovshovye ekskavatory: proektirovanie i raschet. Ekaterinburg: UrFU, 2012.

7. Buryj G.G., Shcherbakov V.S. Sovershenstvovanie konstrukcii kovsha gidravlicheskogo ekskavatora // Vestnik SibADI, 2019, tom 16, № 3, s. 203-213.

8. Karpov V.V., Temnov V.I., Biryuchev B.N., Shapiro M.S., Kriger S.D. Kovsh ekskavatora s vibriruyushchimi zub'yami / Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 611975.

9. Pol'skij S.B., Levin R.V., Kruglov I.K. Gidravlicheskij privod vibracionnyh zub'ev ekskavatornogo kovsha / Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1180462.

10. Panovko Ya.G. Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara. M.: Nauka, 1977.

11. Skobelev S.B. Skhemy nagruzheniya kovshej v processe kopaniya // Vestnik Sibirskoj gosudarstvennoj avtomobil'no-dorozhnoj akademii, 2019, tom 16, № 3, s. 202-204.

12. Ivanov R.A., Fedulov A.I. Metodika rascheta kovsha aktivnogo dejstviya // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2005, № 5, s. 28-31.

13. Tarasov V.N., Kovalenko M.V. Mekhanika kopaniya gruntov, osnovannaya na teorii predel'nyh kasatel'nyh napryazhenij // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2003, № 7, s. 38-43.

14. Pat. 194752 Rossijskaya Federaciya, MPK E02F 3/40. Kovsh zemlerojnoj mashiny / Ya.L. Liberman, K.Yu. Letnev (Rossiya) – № 2019120419; Zayavleno 01.07.2019; Opubl. 23.12. 2019.

15. Kuznecova V.N., Savinkin V.V. Obespechenie energoeffektivnosti razrabotki grunta za schet optimizacii uglov pozicionirovaniya rabochego oborudovaniya ekskavatora // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny, 2015, № 3, s. 44-47.

Поступило в редакцию 10.01.2021
Received 10 January 2021