

# Землерийні, дорожні та меліоративні машини

УДК 621.225:69.002.51

А.П. Холодов, асистент (ХНАДУ, Харків)

## АККУМУЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В РАБОЧЕМ ЦИКЛЕ БУЛЬДОЗЕРОВ

**АННОТАЦІЯ.** Розглянуто систему «оператор – бульдозер – робоча середа» з урахуванням використання гідроакмулюючої системи. Обґрунтовано можливість накопичення енергії на холостих (зворотних) ходах землерийно-транспортних машин (ЗТМ) в гідропневмоаккумуляторі й подальшого її використання на навантажених режимах роботи (копанні ґрунту). Приведено теоретичне обґрунтування витрати потужності двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) на холостому (зворотному) ході бульдозерів на зарядку гідроакмулюючої системи.

**Ключові слова:** акумулятор, енергія, гідропривід, потужність, робочий цикл.

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрена система «оператор – бульдозер – рабочая среда» с учетом использования гидроаккумулирующей системы. Обоснована возможность накопления энергии на холостых (обратных) ходах землеройно-транспортных машин (ЗТМ) в гидропневмоаккумуляторе и дальнейшем ее использовании на нагруженных режимах работы (копанию грунта). Приведено теоретическое обоснование расхода мощности двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на холостом (обратном) ходу бульдозеров на зарядку гидроаккумулирующей системы.

**Ключевые слова:** аккумулятор, энергия, гидропривод, мощность, рабочий цикл.

**SUMMARY.** The system of "operator – bulldozer – the working environment" with regard to the use of hydraulic accumulating systems is reviewed. The possibility of accumulation of energy at idle (reverse) moves Earthmoving machines in hydraulic accumulator and continue to use it on busy modes (digging soil) is justified. The theoretical justification for the power consumption of internal combustion engine at idle (reverse) run of bulldozers on the charge of hydraulic accumulating systems are presented.

**Key words:** accumulator, energy, the hydraulic drive, power, work cycle.

### Введение

В данной статье рассматривается проблема использования гидроаккумулирующих систем на бульдозерах. Под гидроаккумулирующей системой автор принимает совокупность гидравлического оборудования включающего гидропневмоаккумулятор (ГПА) и гидрораспределительную аппаратуру, обеспечивающие зарядку аккумулятора на холостом (обратном) ходу машины и ее возврат на нагруженных режимах работы.

### Анализ публикаций

В современном мире наиболее важными требованиями, предъявляемыми к дорожно-строительной технике, и технике в общем, являются экономичность и производительность.

Обеспечить данные требования можно путем использования аккумуляторов энергии.

По своему устройству аккумуляторы, которые предлагаются к использованию в машиностроении, могут быть объединены в следующие группы: механические (грузовые, пружинные и др.) [5, 6]; гидравлические [7, 8]; пневматические [5]; электрические; химические и тепловые аккумуляторы [1].

Однако для землеройно-транспортных машин (ЗТМ) циклического действия, режим работы гидропривода которых характеризуется резковывраженной циклическостью, наиболее целесообразно устанавливать гидропневматический аккумулятор – простой по конструкции, компактный и удобный в эксплуатации автономных гидросистем [7, 8, 9].

### Цель и постановка задачи

Целью работы является повышение эффективности бульдозеров за счет аккумуляции энергии, накопленной в гидроаккумулирующей системе на холостом (об-

ратном ходу) машины, для увеличения производительности за счет снижения длительности цикла и снижения расхода топлива за счет использования накопленной энергии на режиме копания.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- на основе существующих теоретических исследований ЗТМ и на основе проведенных экспериментальных исследований гидроаккумулирующих систем [2, 3, 4, 10] установить характер расхода мощности ДВС бульдозера с учетом использования гидроаккумулирующей системы;
- разработать теоретическое обоснование применения гидроаккумулирующих систем на бульдозерах.

**Изложение основного материала**

*Расчетные схемы бульдозеров с системой аккумулярования энергии*

В рабочем цикле бульдозера во время операции копания мощность ДВС распределяется на гидросистему для привода рабочего оборудования и на трансмиссию (рис. 1), которая определяется по формуле

$$N_{\text{ДВС.коп}} = N_{\text{тр}} + N_{\text{гс}}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{тр}}$  – мощность, затрачиваемая на трансмиссию;  $N_{\text{гс}}$  – мощность, затрачиваемая на гидросистему.

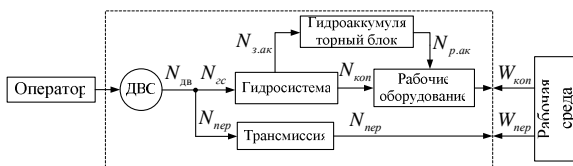


Рис. 1. Система «оператор – бульдозер – рабочая среда»

Отношение мощности гидропривода к общей мощности двигателя характеризуется коэффициентом  $\beta$

$$\beta = \frac{N_{\text{ДВС}}}{N_{\text{гс}}}. \quad (2)$$

Коэффициент,  $\delta$  характеризующий использование гидропривода по времени  $t_{\text{гс}}$

по отношению к общему времени работы машины  $t_{\text{м}}$ ,

$$\delta = \frac{t_{\text{гс}}}{t_{\text{м}}}. \quad (3)$$

Распределение мощности при операции копания можно представить как показано на рис. 2.

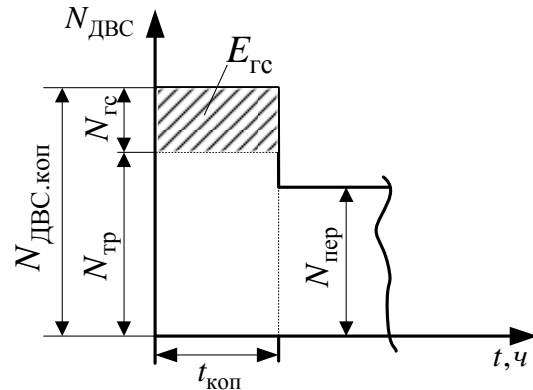


Рис. 2. Распределение мощности на операции копания:  $E_{\text{гс}}$  – энергия, расходуемая гидросистемой в процессе копания;  $N_{\text{гс}}$  – мощность, которую ДВС затрачивает на гидросистему;  $N_{\text{ДВС.коп}}$  – мощность, расходуемая ДВС на этапе копания;  $N_{\text{тр}}$  – мощность, которую затрачивает ДВС на привод ходового оборудования;  $N_{\text{пер}}$  – мощность, затрачиваемая на операции перемещения грунта;  $t_{\text{коп}}$  – время копания

Если рассмотреть составляющие общего тягового сопротивления  $W_{\text{з.т.о.}}$ , действующего на машину в ее рабочем цикле, то эти составляющие можно разделить на сопротивление, действующие на трансмиссию и сопротивление действующие на гидросистему машины. Приняв допущение, что физико-механические свойства грунта и углы установки исполнительного оборудования остаются переменными запишем сопротивления, которые относятся к действующим на гидросистему: сопротивление копанию грунта  $W_{\text{коп}}$ , зависящие от свойств грунта; сопротивление наполнению отвала бульдозера  $W_{\text{н.р.о.}}$ ; сопротивление от затупления ножей  $W_{\text{з.н.}}$ ; инерционное сопротивление  $W_{\text{ин}}$ .

При условии, что бульдозер имеет поворотный отвал необходимо учитывать сопротивление от перемещения грунта вдоль

отвала  $W_{ГВ}$ . То можно записать суммарное сопротивление, которое воспринимает гидросистема:

$$W_{Гс} = W_{коп} + W_{н.р.о.} + W_{ин} + W_{з.н.} + W_{ГВ}; \quad (4)$$

$$A = K b h / s_h, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент сопротивления резанию;  $b$  – ширина отвала;  $h$  – глубина резания;  $s_h$  – путь, который проходит бульдозер до достижения необходимой глубины копания.

Для осуществления копания гидросистеме необходимо передать на шток гидроцилиндра, который кинематически связан с отвалом бульдозера  $R_{ц.з.}$ , сопротивление равное  $W_{Гс}$ , отсюда

$$R_{ц.з.} k_{кп} = W_{Гс}, \quad (6)$$

где  $k_{кп}$  – коэффициент, учитывающий кинематическую связь штока цилиндра с отвалом бульдозера;  $R_{ц.з.}$  – усилие заглабления отвала.

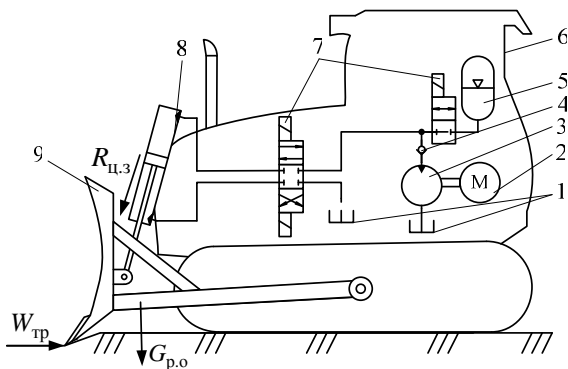


Рис. 3. Обобщенная кинематико-гидравлическая схема бульдозера, оснащенного гидроаккумулирующей системой: 1 – гидробак; 2 – ДВС; 3 – гидронасос; 4 – обратный клапан; 5 – гидропневмоаккумулятор; 6 – бульдозер; 7 – гидрораспределители; 8 – гидроцилиндр; 9 – отвал

Мощность, которую необходимо передать гидросистеме при копании грунта,

$$N_{Гс} = R_{ц.з.} v_{ш}, \quad (7)$$

где  $v_{ш}$  – скорость перемещения штока гидроцилиндра, м/с;

$$v_{ш} = Q / A, \quad (8)$$

где  $Q$  – расходы жидкости, см<sup>3</sup>/с;  $A$  – рабочая площадь цилиндра.

Так как полученная мощность  $N_{Гс}$  должна поддерживаться на протяжении всего времени копания  $t_{коп}$  грунта, то получаем энергию, которую необходимо потратить гидросистеме на операцию копания,

$$E_{ак} = N_{Гс} t_{коп}. \quad (9)$$

Полученную энергию можно накапливать в ГПА на холостом (обратном) ходу бульдозера и возвращать в гидросистему на этапе копания. Это позволит снизить установившуюся мощность двигателя до уровня, необходимого на перемещение машины, что приведет к снижению расхода топлива.

В режиме холостого хода бульдозера его ДВС использует лишь незначительную долю мощности для обеспечения работы механизма перемещения. Предлагается аккумулирование доли мощности ДВС (рис. 4) путем преобразования в гидравлическую энергию за счет накопления ее в гидропневмоаккумуляторе.

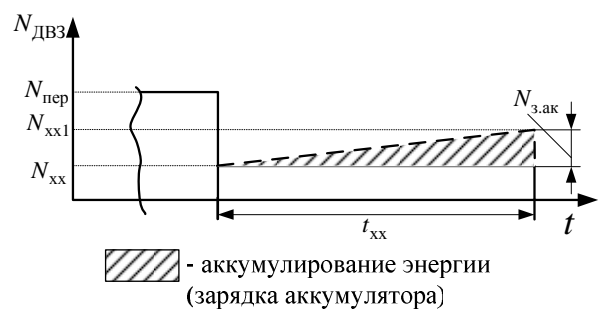


Рис. 4. Режим холостого хода бульдозера с возможностью аккумулирования энергии:  $N_{з.ак}$  – мощность, затрачиваемая на зарядку ГПА;  $N_{хх1}$  – мощность, затрачиваемая двигателем на режиме холостого (обратного) хода при зарядке аккумулятора

Мощность, накапливаемая в ГПА во время холостого хода,

$$N_{з.ак} = Q_{н.а} p_{н.а}, \quad (10)$$

где  $Q_{н.а}$  – подача жидкости на выходе насоса в режиме холостого хода бульдозера в период подключения насоса к ГПА;  $p_{н.а}$  – давление жидкости на выходе насоса в режиме холостого хода бульдозера в период зарядки гидропневмоаккумулятора.

Рост накопленной энергии, которая аккумулируется в ГПА при условно-линейной закономерности, определяется по формуле, кВт·с

$$E_{ак} = 0,5 N_{з.ак} t_{xx}. \quad (11)$$

*Теоретическое обоснование расхода мощности ДВС на холостом (обратном) ходу на зарядку гидроаккумулирующей системы*

Мощность двигателя на холостом ходу определяется  $N_{xx}$ . С учетом процесса аккумуляирования энергии мощность ДВС на холостом ходу теоретически повысится на величину  $N_{ак}$ . То есть за время холостого хода  $t_{xx}$  гидронасос должен обеспечить такую подачу  $Q_{н}$ , чтобы подать объем подаваемой жидкости равнялся объему гидропневмоаккумулятора  $\Delta V_{ак}$  (рис. 5).

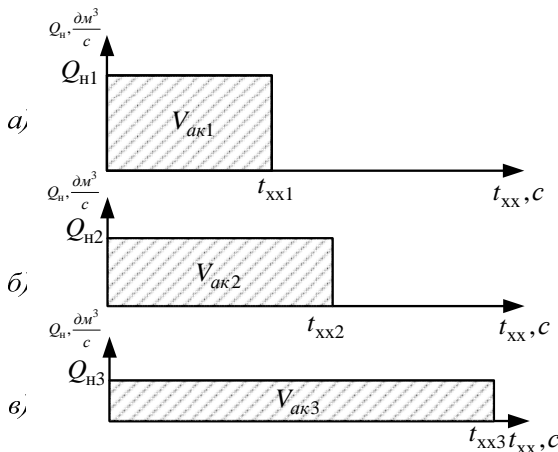


Рис. 5. Зависимость подачи насоса от продолжительности обратного (холостого) хода машины  $t_{xx}$ : а – при  $t_{xx1}$ ; б – при  $t_{xx2}$ ; в – при  $t_{xx3}$

Данный объем определяется по формуле

$$Q_{н} t_{xx} = \Delta V_{ак} = const. \quad (12)$$

Запишем формулу для мощности ДВС на холостом ходу с зарядкой ГПА.

$$N_{ДВЗ_{xx}} = N_{xx} + N_{н.ак}, \quad (13)$$

где  $N_{н.ак}$  – мощность, которую должен развить насос для зарядки ГПА

$$\Delta V = \frac{Q_{н} t_{xx}}{\eta_{н}}. \quad (14)$$

Откуда выразим необходимую подачу насоса на этапе зарядки ГПА

$$Q_{н} = \frac{\Delta V \eta_{н}}{t_{xx}}; \quad (15)$$

$$n_{н} = \frac{1000 Q_{н}}{q}, \quad (16)$$

где  $q$  – рабочий объем насоса, который указывается в его рабочей характеристике.

Подставив (15) в (17) получим частоту оборотов вала гидронасоса для обеспечения подачи необходимого объема жидкости в ГПА за время холостого хода.

$$n_{н} = 1000 \frac{\Delta V \eta_{н}}{q t_{xx}}. \quad (17)$$

Получаем выражение для определения мощности затрачиваемой ДВС на холостом ходу для бульдозера с гидроаккумулирующей системой

$$N_{ДВЗ_{xx}} = W_{пер.м.} v_{xx}^2 + q n_{н} p_{н} \quad (18)$$

При использовании гидроаккумулирующей системы возможен режим работы ДВС с постоянной заданной мощностью.

$$N_{ДВЗ} = N_{PO} + N_{П} + N_{H_{ГП}} = const, \quad (19)$$

где  $N_{ДВЗ}$  – эффективная мощность первичного двигателя;  $N_{PO}$  – мощность, затрачиваемая на рабочее оборудование в процессе копания им грунта;  $N_{П}$  – мощность, которая расходуется механизмом передвижения машины;  $N_{H_{ГП}}$  – неиспользованная мощность, на которой работает на-

сос, и, которая накапливается непосредственно в гидроаккумуляторе.

Рассмотрим каждую составляющую отдельно. Переменная мощность, затрачиваемая рабочим оборудованием, в процессе копания грунта отвалом,

$$N_{PO} = \frac{v_{ш} \cdot P_{ц.з.}}{\eta_{мк}}, \quad (20)$$

где  $v_{ш}$  – скорость перемещения штока гидроцилиндра;  $P_{ц.з.}$  – усилие, развиваемое штоком гидроцилиндра;  $\eta_{мк}$  – КПД механизма копания.

Переменная мощность, которая используется механизмом передвижения бульдозера:

$$N_{П} = \frac{M \cdot \omega}{\eta_{мп}}, \quad (21)$$

где  $M$  – момент на валу гидромотора;  $\omega$  – угловая скорость;  $\eta_{мп}$  – КПД механизма передвижения

Мощность двигателя

$$N_{ДВЗ} = G_T \cdot I \cdot \eta_{ДВЗ}, \quad (22)$$

где  $G_T$  – расход топлива ДВС;  $I$  – теплотворная способность топлива;  $\eta_{ДВЗ}$  – общий КПД ДВС.

Переменная мощность создаваемой гидроаккумуляторной системой:

$$N_{H2} = P_a \cdot V_k \cdot n, \quad (23)$$

где  $P_a$  – давление в гидроаккумуляторе;

$V_k$  – объем рабочей камеры насоса;  $n$  – частота вращения вала насоса.

### Выводы

В результате проведенных экспериментов была разработана теория поведения ДВС бульдозера на холостом (обратном) ходу позволяющая определять затраты мощности на гидроаккумуляторную систему.

### Литература

1. *Хмара Л.А.* Применение аккумуляторов потенциальной энергии в строительных машинах (на примере одноковшового экскаватора) / Л.А. Хмара / Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. Интенсификация рабочих процессов строи-

- тельных и дорожных машин. – Днепропетровск: ПГАСА, – 2005. – Вып. 33. – С.17–33.
2. *Хмара Л.А.* Повышение эффективности бульдозеров путем использования гидроаккумуляторной системы / Л.А. Хмара, А.П. Холодов // Строительные и дорожные машины – 2012 – № 3 – С. 33 – 37.
3. *Хмара Л.А.* Экспериментальные исследования гидроаккумуляторной системы / Л.А. Хмара, А.П. Холодов, А.В. Ярыжко // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – № 63– Днепропетровск: ВГУЗ ПГАСА, 2011. – С. 69 – 78.3.
4. *Гулия Н.В.* Удивительная механика. В поисках «энергетической капсулы» / Н.В. Гулия – Издательство: НЦ ЭНАС, 2006. – 176 с.
5. *Хмара Л.А.* Испытания бульдозера с системой аккумуляции энергии / Л.А. Хмара, А.П. Холодов // Сб. науч. тр.: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – 2011 – № 63 – Днепропетровск: ВГУЗ ПГАСА. – С. 61 – 69.
6. *Гулия Н.В.* Инерционные двигатели для автомобилей. / Н.В. Гулия – М.: Транспорт, 1974. – 64 с.
7. *Волоцкий В.М.* Гидроприводы машин и их оборудование. Учебный курс. / В.М. Волоцкий. – Х.: Гидроэлкс, 1995. – 156 с.
8. *Алексеева Т.В.* Использование принципа аккумуляции энергии в системе управления землеройно-транспортной машины / Т.В. Алексеева, Ю.В. Ремизович, В.Г. Шерман // Исследования и испытания дорожных и строительных машин: Сб. науч. работ СибАДИ. – 1969. – Вып. 1. – С. 70–75.
9. *Щербаков В.Ф.* Рекуперативная система привода гидроподъемных машин / В.Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины.– 2008.– № 9.– С. 49-51
10. *Щербаков В.Ф.* Энергосберегающие гидроприводы строительных и дорожных машин / В.Ф. Щербаков // Строительные и дорожные машины.– 2011.– № 10.– С. 1–2.

Рецензент: Е.С. Венцель, д.т.н., проф.  
(ХНАДУ, Харьков)

Отримано: 03.04.2012 р.