

Д. т. н. Н. М. Суслов, д. т. н. С. Я. Давыдов (✉), д. т. н. Д. Н. Суслов,
С. А. Чернухин

ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный
университет», Екатеринбург, Россия

УДК 621.879.323:62-82]:658.589

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ ПНЕВМОГИДРОАККУМУЛЯТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА

Принято решение использовать аккумулированную энергию поднятой передней кромки машины в момент опускания ее на грунт для совершения манипуляций с опорными башмаками. Выполнен расчет параметров механизма шагания и выделяемой энергии при опускании передней кромки базы экскаватора. Рассчитано количество энергии, запасаемой в пневмогидроаккумуляторах. Результаты расчета показали, что запасенной энергии в пневмогидроаккумуляторах достаточно для проведения маневровых операций с опорными башмаками. Это повышает эффективность работы механизма шагания и работы экскаватора-драглайна в целом.

Ключевые слова: экскаватор-драглайн, тепловая энергия, механизм шагания, гидропривод, рабочая жидкость, пневмогидроаккумулятор.

Для оптимизации процесса шагания экскаватора-драглайна и снижения энергозатрат при его перемещении он постоянно подвергается конструктивным изменениям. Наибольшее распространение получил трехопорный гидравлический шагающий механизм, обеспечивающий минимальное удельное давление на грунт как при работе, так и при перемещении машины. Это важно при ведении работ на карьерах с низкой несущей способностью грунтов за счет больших опорных поверхностей механизма шагания.

В известных экскаваторах-драглайнах [1, 2] потенциальная энергия поднятой над грунтом передней кромки базы переходит в тепловую и выбрасывается в атмосферу, не позволяя температуре рабочей жидкости превысить 60 °С.

В процессе подъема передней (по ходу движения) кромки базы на значительную высоту для обеспечения требуемой величины шага необходимо рекуперировать потенциальную энергию поднятой над грунтом передней кромки базы в момент опускания ее на грунт. Потенциальная энергия поднятой передней кромки базы в момент опускания переходит в тепловую энергию рабочей жидкости гидросистемы привода механизма шагания, так как плавное опускание передней кромки базы на грунт достигается дросселированием рабочей жидкости [1–3].

Установлено, что оптимальная температура рабочей жидкости, обеспечивающая корректную работу всей гидравлической системы, при установившемся температурном режиме составляет 55–60 °С [4]. Более высокие температуры рабочей жидкости снижают срок службы гидроагрегатов, вызывают пенообразование и отрицательно влияют на минеральные масла.

Механизм шагания трехопорного экскаватора-драглайна [5] показан на рис. 1. В корпусе 1 машины вместо гидроаккумуляторов размещены пневмогидроаккумуляторы, встроенные в гидравлическую систему механизма шагания [6], при помощи которых возможна рекуперация потенциальной энергии поднятой над грунтом передней кромки базы 2.

Использование скользящих 3 и горизонтальное размещение тяговых гидроцилиндров 4 на

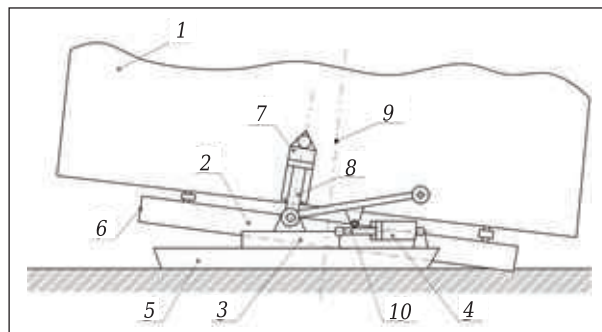


Рис. 1. Трехопорный механизм шагания экскаватора-драглайна: 1 — корпус; 2 — база; 3 — скользящий элемент; 4 — тяговый гидроцилиндр; 5 — опорный башмак; 6 — передняя кромка базы; 7 — подъемный гидроцилиндр; 8 — шток подъемного гидроцилиндра; 9 — центр масс экскаватора-драглайна; 10 — шток тягового гидроцилиндра



С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

опорных башмаках 5 механизма шагания [5] позволяет осуществить шаг с минимальным отрывом передней кромки 6 базы 2 не более 0,1 м. При этом работа дроссельной заслонки, установленной в гидросистеме механизма шагания, обеспечивает плавность опускания базы 2 на грунт. Применение пневмогидроаккумуляторов с поршнем 2 (рис. 2) в гидравлической системе механизма шагания [7, 8] дает возможность аккумуляции энергии при опускании машины на грунт. Аккумулирование энергии без выброса ее через тепло в атмосферу позволяет поддерживать оптимальную температуру рабочей жидкости [3], а также сократить энергозатраты на совершение манипуляций с опорными башмаками 5 за счет исключения приводного насоса гидравлической системы механизма шагания.

С учетом особенностей условий использования гидроаккумуляторов [9] в гидросистеме привода механизма шагания экскаватора-драглайна предложены поршневые пневмогидроаккумуляторы, показанные на рис. 2 (<http://www.hydro-pnevmo.ru/topic.php?ID=42>).

Поршневой пневмогидроаккумулятор (см. рис. 2) состоит из корпуса 1, в котором расположен поршень 2 с уплотнениями 3, обеспечивающими герметичное разделение газа и жидкости. Подвод рабочей жидкости с гидравлической системы механизма шагания в момент опускания передней кромки базы на грунт — через канал 4. Зарядка пневмогидроаккумуляторов газом осуществляется через запорный вентиль 5. В поршневом гидравлическом аккумуляторе на поршень 2 с одной стороны действует давление сжатого газа, с другой стороны — давление жидкости. Накопление энергии в поршневых пневмогидроаккумуляторах осуществляется за

счет сжатия газа, находящегося в них под давлением [8].

Использование поршня в качестве разделителя сред влечет за собой такие недостатки, как трение поршня в цилиндре и невысокое быстродействие в процессе работы (движение поршня ограничено скоростью 2 м/с). Эти недостатки существенно не сказываются на работе гидросистемы в целом.

Потери энергии, перешедшей в тепло, рассчитываются как разность между мощностью потребляемой насосом гидросистемы механизма шагания и полезной (отведенной) мощностью [9, 10]:

$$N_{\text{пот}} = N_{\text{под}} - N_{\text{отв}}, \quad (1)$$

где $N_{\text{пот}}$ — тепловой эквивалент отведенной мощности, Вт; $N_{\text{под}}$ — подведенная мощность к насосу, Вт; $N_{\text{отв}}$ — отведенная мощность, Вт.

$$N_{\text{под}} = p \frac{Q_n}{\eta_n}, \quad (2)$$

$$N_{\text{отв}} = \Delta p_{\text{общ}} \cdot Q_n, \quad (3)$$

где p — давление на выходе из насоса, Н/м²; Q_n — массовый расход жидкости (подача насоса гидросистемы механизма шагания), кг/с; η_n — КПД насоса; $\Delta p_{\text{общ}}$ — разница давления рабочей жидкости на входе и выходе гидросистемы, Н/м².

$$N_{\text{отв}} = Q_n \cdot c \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где c — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·град); Δt — перепад температуры, °С.

Согласно [11] Δt в гидросистеме рассчитывается по формуле

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\rho \cdot c} \left(\frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right), \quad (5)$$

где Δp — разница давления рабочей жидкости на входе и выходе из дросселя гидросистемы механизма шагания [12], Н/м²; ρ — плотность рабочей жидкости, кг/м³.

При прохождении жидкости через дроссельную заслонку, применяемую для плавного опускания передней кромки базы экскаватора-драглайна [12], потенциальная энергия давления рабочей жидкости преобразуется в тепло. При принятии того, что теплоотдача в дросселе минимальна, можно считать, что вся энергия, теряемая рабочей жидкостью, идет на повышение температуры Δt , тогда [11]:

$$\Delta t = \frac{\Delta p}{\rho \cdot c}. \quad (6)$$

Количество тепла Q_t , Дж/с, выделяемого в гидросистеме за 1 с, определяется приводной мощностью насоса привода гидросистемы механизма шагания [3, 11, 12]:

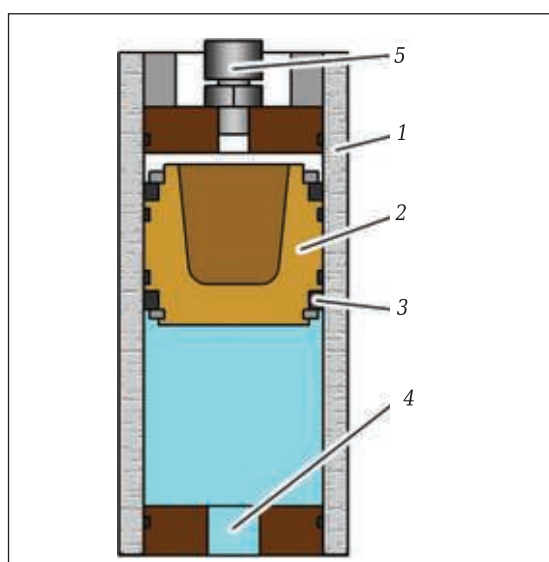


Рис. 2. Поршневой пневмогидроаккумулятор: 1 — корпус; 2 — поршень; 3 — уплотнения; 4 — канал подвода рабочей жидкости; 5 — запорный вентиль

$$Q_r = N_{пр} = \frac{p_k \cdot Q_n}{\eta_{общ}}, \quad (7)$$

где $N_{пр}$ — приводная мощность насоса гидросистемы механизма шагания, Дж/с; p_k — давление жидкости в гидросистеме, Н/м²; $\eta_{общ}$ — общий КПД насоса.

За счет установки пневмогидроаккумуляторов в гидравлическую систему механизма шагания появляется возможность рационального использования запасенной энергии в процессе плавного опускания базы экскаватора на грунт. Использование аккумулированной энергии возможно при осуществлении маневровых операций с опорными башмаками. Маневровые операции с башмаками состоят из выноса их в направлении движения драглайна, опускания на грунт и подъема опорных башмаков. Для расчета операции подъема опорных башмаков необходимо рассчитать усилия P_n , Н, на штоках подъемных гидроцилиндров [9]:

$$P_n = P'_n + P''_n, \quad (8)$$

где P'_n — составляющие усилий на штоках подъемных гидроцилиндров от действия силы тяжести опорных башмаков, Н; P''_n — составляющие усилий на штоках подъемных гидроцилиндров от действия силы тяжести штоков подъемных гидроцилиндров, штоков тяговых гидроцилиндров, корпусов тяговых гидроцилиндров и скользунов, расположенных на опорных башмаках, Н.

Работа A_n , Н·м, на подъем опорных башмаков тяговыми цилиндрами рассчитывается [9, 7] так:

$$A_n = P_n \cdot h_6, \quad (9)$$

где h_6 — расстояние между уровнем грунта и опорной плоскостью башмаков драглайна в стационарном положении, м.

При выносе опорных башмаков (выдвижении вперед по ходу движения драглайна) работу выполняют только тяговые гидроцилиндры. Расстояние, на которое выносятся опорные башмаки, соизмеримо с длиной шага. Работа A_t , Н·м, совершаемая тяговыми гидроцилиндрами в этот момент, рассчитывается по формуле

$$A_t = L \cdot m_6 \cdot f_{тр} \cdot g, \quad (10)$$

где L — длина шага экскаватора-драглайна, м; m_6 — масса опорных башмаков, кг; $f_{тр}$ — коэффициент скольжения, $f_{тр} = 0,07$; g — ускорение свободного падения, м/с².

При опускании опорных башмаков на грунт за счет установки пневмогидроаккумуляторов в гидравлическую систему привода механизма шагания появляется возможность аккумулирования энергии $A_{опуск}$, Н·м:

$$A_{опуск} = (m_6 + m_{п.п} + m_t + m_{шт.т})h_6 \cdot g, \quad (11)$$

где $m_{п.п}$ — масса штоков подъемных гидроцилиндров, кг; m_t — масса корпусов тяговых гидроцилиндров и скользунов, кг; $m_{шт.т}$ — масса штоков и поршней тяговых пневмогидроаккумуляторов, кг.

Работа A , Н·м, расходуемая на подъем экскаватора [9]:

$$A = Kgmh, \quad (12)$$

где K — коэффициент, указывающий, какая часть массы экскаватора-драглайна передается на башмаки при шагании, $K = 0,7 \div 0,8$; m — масса экскаватора, кг; h — высота подъема центра масс экскаватора, необходимая для совершения шага, м.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМА ШАГАНИЯ [1, 10]

Зависимость массы m_6 , кг, опорных башмаков от массы экскаватора-драглайна выражается формулой [9]

$$m_6 = 0,009 \cdot m^{1,2}. \quad (13)$$

Масса $m_{п.п}$, кг, штока подъемного гидроцилиндра:

$$m_{п.п} = k_1 \cdot m \cdot p_n^{-1}, \quad (14)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, $k_1 = 0,114$; p_n — давление жидкости в рабочих полостях подъемного гидроцилиндра, Н/м².

Масса m_t , кг, корпуса тягового гидроцилиндра и масса $m_{шт.т}$, кг, штока с поршнем тягового пневмогидроаккумулятора [9, 10]:

$$m_t = k_2 \cdot m \cdot p_t^{-1}, \quad (15)$$

$$m_{шт.т} = k_3 \cdot m \cdot p_t^{-1}, \quad (16)$$

где k_2 и k_3 — коэффициенты пропорциональности, $k_2 = 0,18$, $k_3 = 0,065$; p_t — давление рабочей жидкости в полостях тягового гидроцилиндра, Н/м².

Произведен расчет параметров трехопорного гидравлического механизма шагания для основных типов экскаваторов-драглайнов Уральского завода тяжелого машиностроения (УЗТМ) по представленным зависимостям. Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, будут использованы для определения энергозатрат на перемещение разных типов экскаваторов-драглайнов, оснащенных трехопорным механизмом шагания.

На примере экскаватора-драглайна ЭШ-14/75, оснащенного трехопорным механизмом шагания со скользунами и горизонтально расположенными тяговыми гидроцилиндрами на опорных башмаках, проведены расчеты совершаемой работы A на поднятие передней кромки опорной базы, A_n на подъем, $A_{опуск}$ на опускание опорных башмаков и A_t на подачу опорных башмаков:

$$A = 0,75 \cdot 9,8 \cdot 1400 \cdot 10^3 \cdot 0,1 = 1029 \text{ кН·м,}$$

Таблица 1. Результаты расчетов основных параметров трехопорных гидравлических механизмов шагания экскаваторов-драглайнов

Тип экскаватора-драглайна	Масса машины, 10 ³ кг	Масса опорных башмаков, 10 ³ кг	Масса штока подъемного гидроцилиндра, 10 ³ кг	Масса поршня со штоком тягового гидроцилиндра, 10 ³ кг	Масса цилиндра тягового гидроцилиндра, 10 ³ кг	Длина шага, м
ЭШ-14/75	1400	47,0	9,5	5,2	15,2	1,9
ЭШ-15/90	1410	65,8	9,5	5,2	15,2	2,0
ЭШ-15/90А	1626	6,8	10,7	5,35	18,25	2,0
ЭШ-25/100	2600	104,5	14,6	9,31	21,2	2,5
ЭШ-80/100	10300	776,3	25,8	21,15	51,5	2,9

$$A_n = (9,5 + 5,2 + 15,2) \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 9,8 = 146,51 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$A_{\text{опуск}} = A_n = 146,51 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

$$A_r = 1,9 \cdot 47 \cdot 10^3 \cdot 0,07 \cdot 9,8 = 61,26 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Затрачиваемая работа A_6 на манипуляции с опорными башмаками:

$$A_6 = A_n + A_r = 146,51 + 61,26 = 207,77 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

За счет потерь на трение поршня, являющегося разделителем сред в пневмогидроаккумуляторе, а также потерь на преодоление сил трения по длине трубопроводов и местные гидравлические сопротивления в процессе зарядки пневмогидроаккумуляторов теряется доля аккумулируемой энергии. Следовательно, при опускании базы на грунт и при опускании опорных башмаков рекупируется не вся, а определенная часть затраченной энергии [13]. С учетом этих потерь произведен расчет энергозатрат на совершение одного шага и аккумуляцию энергии для шагающих экскаваторов-драглайнов УЗТМ. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Из полученных расчетных данных видно, что запасенной в момент опускания передней кромки базы на грунт энергии в пневмогидроаккумуляторах достаточно для совершения манипуляций с опорными башмаками.

Параметры пневмогидроаккумуляторов, установленных в гидросистему трехопорного механизма шагания экскаватора-драглайна, рассчитываются по формуле [13, 14]

$$PV^N = \text{const}, \quad (17)$$

где P — давление в пневмогидроаккумуляторе, Н/м²; V — объем пневмогидроаккумулятора, м³; N — показатель политропы, принимается $N = 1,4$ (https://studopedia.ru/5_913_raschet-i-obsluzhivanie-pnevmogidroakkumulyatorov.html).

Для определения полезного объема V_n , м³, пневмогидроаккумулятора используется формула [13–15]:

$$V_n = V_k \left[\left(\frac{P_n}{P_{\min}} \right)^{\frac{1}{N}} - \left(\frac{P_n}{P_{\max}} \right)^{\frac{1}{N}} \right], \quad (18)$$

где V_k — конструктивный объем аккумулятора, м³; P_n — начальное давление в пневмогидроаккумуляторе (выбирается равным $0,9P_{\min}$, Н/м²); $P_{\min}$ — минимально допустимое давление в конце разрядки, Н/м²; $P_{\max}$ — давление в пневмогидроаккумуляторе в конце зарядки, Н/м².

В механизме шагания при осуществлении шага экскаватором-драглайном в момент плавного опускания передней кромки базы на грунт за счет дросселирования происходит нагрев рабочей жидкости и узлов гидросистемы. Установка пневмогидроаккумуляторов в гидравлическую систему привода механизма шагания, а также горизонтальное размещение тяговых гидроцилиндров на опорных башмаках позволяют аккумулировать энергию поднятой передней кромки базы экскаватора-драглайна. Произведенные расчеты на примере ряда экскаваторов-драглайнов УЗТМ позволяют утверждать, что запасенной энергии в пневмогидроаккумуляторах достаточно для осуществления манипуляций с опорными башмаками в процессе передвижения экскаватора-драглайна. Это значительно повышает эффективность работы механизма шагания и экскаватора-драглайна в целом.

Библиографический список

1. *Подэрни, Р. Ю.* Горные машины и комплексы для открытых работ : уч. для вузов / Р. Ю. Подэрни. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Недра, 1985. — 544 с.

Таблица 2. Энергозатраты за один шаг шагающих экскаваторов-драглайнов УЗТМ

Тип машины	Расход энергии, кН·м		Количество аккумулируемой энергии, Н·м	
	на отрыв передней кромки базы	на манипуляции с опорными башмаками	при опускании базы на грунт	при опускании опорных башмаков на грунт
ЭШ-14/75	1029,0	207,77	720,3	102,56
ЭШ-15/90	1036,35	236,79	725,45	102,56
ЭШ-15/90А	1195,11	177,4	836,58	117,65
ЭШ-25/100	1911,0	400,26	1337,7	154,73
ЭШ-80/100	7570,5	2026,78	5299,35	337,68

2. **А. с. 76031 СССР.** Двигатель для моторных повозок, преимущественно для экскаваторов / Т. Е. Исаев, Б. И. Сатовский. — № 379023; заявл. 24.05.1948; опубл. 1949.
3. **Чернухин, С. А.** Анализ и перспективы развития шагающего ходового оборудования горных машин // Вестник ЗабГУ. — 2018. — № 9. — С. 29–35.
4. **Гринчар, Н. Г.** Основы гидропривода машин : уч. пособие. В 2 ч. Ч. 2 / Н. Г. Гринчар, Н. А. Зайцева. — М. : [б. г.], 2016. — 565 с.
5. **А. с. 825806 СССР.** Механизм шагания экскаватора / П. А. Касьянов, Н. М. Суслов. — № 2809216; заявл. 24.08.1979; опубл. 30.04.1981, Бюл. № 16.
6. **А. с. 1121366 СССР.** Гидропривод ходового оборудования шагающего экскаватора / В. Р. Кубачек, П. А. Касьянов, Н. М. Суслов, В. С. Шестаков. — № 3565604; заявл. 11.03.1983; опубл. 30.10.1984, Бюл. № 40.
7. **Суслов, Н. М.** Гидравлический привод механизма шагания с гидроаккумуляторами / Н. М. Суслов, С. А. Чернухин // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 1. — С. 3–7.
8. **Руппель, Е. Ю.** Приложение рядов для расчета рекуперации кинетической энергии при использовании пневмогидроаккумулятора / Е. Ю. Руппель // Вестник СибАДИ. — 2015. — Вып. 5 (45). — С. 129–135.
9. **Суслов, Н. М.** Совершенствование шагающих механизмов, повышающее эффективность их использования / Н. М. Суслов, С. А. Чернухин // Изв. УГГУ. — 2018. — Вып. 3 (51). — С. 108–113.
10. **Доценко, А. И.** Машины для земляных работ : уч. для студентов вузов / А. И. Доценко, Г. Н. Карасев, Г. В. Кустарев, К. К. Шестопалов. — М. : БАСТЕТ, 2012. — 688 с.
11. **Suslov, N. M.** Thermal calculation of the hydraulic drive for a dragline walking mechanism / N. M. Suslov, S. Ya. Davydov, D. N. Suslov [et al.] // Refract. Ind. Ceram. — 2020. — Vol. 60, № 6. — P. 558–560.
- Суслов, Н. М.** Тепловой расчет гидропривода механизма шагания драглайна / Н. М. Суслов, С. Я. Давыдов, Д. Н. Суслов [и др.] // Новые огнеупоры. — 2019. — № 12. — С. 10–12.
12. **Suslov, N. M.** Using the heat energy the hydraulic drive of a walking mechanism to remove frozen soil / N. M. Suslov, S. Ya. Davydov, D. N. Suslov // Refract. Ind. Ceram. — 2012. — Vol. 53, № 2. — P. 94–96.
- Суслов, Н. М.** Использование тепловой энергии гидропривода механизма шагания для удаления замерзшего грунта / Н. М. Суслов, С. Я. Давыдов, Д. Н. Суслов // Новые огнеупоры. — 2012. — № 3. — С. 143–145.
13. **Малыбаев, Н. С.** Рекомендации по выбору гидроаккумулятора для гидравлической системы / Н. С. Малыбаев, А. Ж. Касенов, К. К. Абишев [и др.] // Наука и техника Казахстана. — 2020. — № 1.
14. **Никитаев, И. В.** Выбор параметров гидроаккумулятора системы амортизации рабочего оборудования подъемно-транспортных машин с жесткой подвеской / И. В. Никитаев // Научные проблемы водного транспорта. — 2012. — № 30.
15. **Лагунова, Ю. А.** Применение гидропневмоаккумуляторов в горных машинах / Ю. А. Лагунова, А. Е. Кальянов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2013. — № 12. — С. 39–41. ■

Получено 15.02.21

© Н. М. Суслов, С. Я. Давыдов,
Д. Н. Суслов, С. А. Чернухин, 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



19-я Международная выставка
лабораторного оборудования
и химических реактивов

13–16.04.2021

МВЦ «Крокус Экспо»

