

УДК 621.22

Г.А. Аврунин, канд. техн. наук,

И.И. Мороз

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (ХНАДУ),

В.Г. Кучер

Представительство фирмы «BONDIOLI & PAVESI» в Украине,

В.Б. Самородов, доктор техн. наук,

Е.В. Твердохлеб,

В.М. Шевцов

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт

ГЕРОТОРНЫЕ ГИДРОМОТОРЫ ФИРМЫ «WHITE HYDRAULICS» (США) — ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧЕГО ОБЪЕМА ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ МАШИНЫ

Наведено огляд технічних характеристик героторних гідромоторів фірми «WHITE HYDRAULICS» та методики розрахунку робочого об'єму гідромотора для привода ходу мобільної машини.

Results of technical performance hydraulic motors «WHITE HYDRAULICS» and calculation of the displacement of motor for mobile hydraulic fluid power transmission.

Введение

Технический прогресс объемного гидропривода проявляется в непрерывном расширении его возможностей для приобретения гидрофицированными машинами и механизмами более прогрессивных свойств и характеристик, таких как энергоемкость (минимизация массы и габаритов при заданной выходной мощности), КПД, реализация режимов энергосбережения, надежность, быстродействие и точность позиционирования, функционирование в критических эксплуатационных условиях и др.

В последние годы широкое распространение получили героторные гидромоторы, классифицирующиеся как шестеренные с внутренним зацеплением, в которых рабочие камеры отделены друг от друга только зубьями шестерен без промежуточного серповидного элемента [1]. Областью применения героторных гидромоторов являются приводы вращательного движения технологического оборудования и передвижения малых сельскохозяйственных машин, машин для уборки улиц, установок для горизонтального бурения и др.

В Украине героторные гидромоторы не выпускаются, поэтому ознакомление с ведущими достижениями мировых производителей, систематизация такого материала и его анализ окажут влияние на формирование актуальных задач для конструкторов и ученых в области объемного гидропривода, откроют для потребителей более широкие возможности подбора гидрооборудования, и, безусловно, будут являться стимулом для развития отечественной конкурентоспособной промышленности.

Фирма «BONDIOLI & PAVESI» (Италия) является на рынке Украины торговым представителем фирмы «WHITE HYDRAULICS», специализирующейся на производстве героторных гидромоторов. Головной офис фирмы находится в США — «White Hydraulics, Inc., World

Headquarters», производство гидромоторов ведется также в ФРГ группой «White Hydraulics GmbH». Фирма «WHITE HYDRAULICS» (США) обладает наиболее широким типоразмерным рядом героторных гидромоторов, рабочий объем которых находится в диапазоне от 50 до 2100 см³.

Безусловный интерес представляет рекомендуемый фирмой «WHITE HYDRAULICS» тяговый расчет, конечной целью которого является выбор соответствующего для проектируемой мобильной машины типоразмера героторного гидромотора.

Основная часть

Фирма «WHITE HYDRAULICS» имеет в своей номенклатуре 15 различных серий героторных гидромоторов [2], обобщенные технические характеристики которых могут быть представлены в следующем виде:

MP — конструкция с цапфенным распределителем, обеспечивает малые частоты вращения. Максимальный КПД достигает 73–80% в зависимости от типоразмера. Диаметры валов 25 и 32 мм на крутящий момент до 675 Н·м;

MR — конструкция с цапфенным распределителем, обеспечивает малые частоты вращения. Максимальный КПД достигает 75–85% в зависимости от типоразмера. Диаметры валов 25 и 32 мм на крутящий момент 610 Н·м;

MS — конструкция с торцовым распределителем. Максимальный КПД достигает 85% для всех типоразмеров серии. Диаметры валов 32 и 35 мм на крутящий момент до 622 Н·м;

RE — конструкция с торцовым распределительным плавающим диском (с гарантированным зазором между контртелами). Диаметры валов 25; 32 и 35 мм на крутящий момент до 1200 Н·м;

Таблица 1

Основные технические характеристики героторных гидромоторов фирмы «WHITE HYDRAULICS»

Серия, рабочие объемы, см ³	Максимальное давление, МПа	Максимальная частота вращения, мин ⁻¹	Максимальный крутящий момент, Нм	Мощность, кВт	Масса, кг
MP 50-400	11-17	185-975	108-533	7,5-6,8	5,6-7,4
MR 50-400	12-20	240-970	126-515	7,9-6,9	6,7-9
MS 80-320	14-21	285-1000	150-410	16,1-20	8,1-10,6
RE 120-750	14-28	130-490	383-1237	12,3-11,1	10,6-17,5
RG 40-320	17-21	235-1020	100-600	6,2-8,4	6,9-9,5
RS 50-400	10-16	220-490	95-463	4,2-7,5	6,1-11,5
DT 300-2100	14-26	50-380	955-3342	11,1-27,4	20,2-40,5
DR 200-750	17-28	150-560	644-1390	14,2-27,3	13,4-30,3
CE 120-750	14-24	130-490	356-1237	12,1-11,3	10,9-20,1
HB 50-400	21-28	230-830	158-1020	9,6-17,8	8,8-22,3

Примечание: Значения мощности получены как произведение номинальной частоты вращения и крутящего момента.

RG — конструкция с торцовым распределительным диском. Диаметр вала 25 мм на максимальный крутящий момент до 650 Н·м;

RS — конструкция с цапфенным распределителем, обеспечивает малые частоты вращения. Диаметр вала 25 мм на максимальный крутящий момент до 680 Н·м;

DT — конструкция с торцовым распределительным диском и гидростатическим прижимом контртел (Three-Zone orbiting valve). Диаметры валов 40; 50 и 60 мм на крутящий момент до 2700 Н·м;

HB — конструкция с торцовым распределительным диском и гидростатическим прижимом контртел (Three-Zone orbiting valve). Диаметры валов 25 и 32 мм на крутящий момент до 882 Н·м;

DR — конструкция с торцовым распределительным диском и гидростатическим прижимом контртел (Three-Zone orbiting valve). Диаметры валов 25 и 32 мм на крутящий момент до 1200 Н·м;

CE — конструкция с торцовым распределительным диском и гидростатическим прижимом контртел (Three-Zone orbiting valve). Диаметр вала 35 мм на крутящий момент до 1200 Н·м;

Примечание: Технические характеристики гидромоторов приведены при температуре рабочей жидкости 54 °С и кинематической вязкости 46 сСт (за исключением серии MS (50 °С и 35 сСт).

Кроме вышеуказанных серий, представленных в таблице 1, фирма рекламирует гидромоторы, тормоза и делители расхода серий MD, MV, MT, BK и FD.

Героторные гидромотор-колеса за последние годы стали оказывать существенную конкуренцию радиально-поршневым гидромоторам однократного и многократного действия для крутящих моментов до 3000 Н·м. В качестве примера приведем основные технические характеристики двух мировых лидеров в области создания радиально-поршневых гидромоторов. Так фирма «SAI» (Италия) производит несколько серий гидромотор-колес

[3] на базе гидромашин однократного (эксцентрикового) действия, в том числе с рабочим объемом от 60 до 800 см³ на номинальное давление 25 МПа и максимальное (пиковое) до 30-58 МПа. Гидромоторы оснащены барабанными тормозами. Масса гидромоторов с тормозом составляет для различных серий от 16 до 77 кг, выходная мощность от 19 до 59 кВт. Например, гидромотор-колесо серии P05-170 с рабочим объемом 166 см³ имеет массу 16 кг и предназначен для работы при перепаде давлений до 35 МПа и частоте вращения до 900 мин⁻¹. Пиковая мощность гидромотора ограничена значением в 37 кВт. Фирма «POCLAIN HYDRAULICS» (Франция) производит серию гидромотор-колес MS на базе радиальнопоршневых гидромоторов многократного действия [4]. В состав гидромотор-колес входят дисковые тормоза. Типоразмерный ряд гидромоторов включает 10 базовых моделей, каждая из которых имеет несколько исполнений по рабочему объему. Минимальное значение рабочего объема 172 см³, максимальное 15000 см³. Гидромоторы предназначены для работы на номинальном давлении 28 МПа, максимальном 45 МПа. Полный КПД гидромоторов достигает 94% при номинальном перепаде давлений 28 МПа и частоте вращения порядка 50% от максимальной. Гидромотор-колесо серии MS02-8 с рабочим объемом 172 см³ имеет массу 21 кг и предназначен для работы на перепаде давлений до 28 МПа и частоте вращения до 390 мин⁻¹, значение пиковой мощности не должно превышать 18 кВт. Героторные гидромоторы фирмы «WHITE HYDRAULICS» серии RE 160 с рабочим объемом 162 см³ имеют массу порядка 10-13 кг на номинальное давление 21 МПа и пиковое 28 МПа.

Рассмотрим методику расчета тягового усилия и выбора типоразмера героторного гидромотора, рекомендуемую фирмой «WHITE HYDRAULICS» для привода хода мобильной машины.

1. При выборе гидромотора для привода хода мобильной машины исходными данными являются:

1.1. Колесная формула — общее количество колес;

Таблиця 2

Коэффициенты сопротивления между колесом и грунтом

Тип покрытия	f_{RR}	Тип покрытия	f_{RR}
1. Бетон превосходный	10	10. Бульжник обычный	55
2. Бетон удовлетворит.	15	11. Бульжник неровный	37
3. Бетон неровный	20	12. Снег толщиной 50 мм	25
4. Асфальт удовлетворит.	12	13. Снег толщиной 100 мм	37
5. Асфальт сухой	17	14. Грунт гладкий	25
6. Асфальт неровный	22	15. Грунт песчаный	37
7. Щебень хороший	15	16. Грязь или глина	37-150
8. Щебень удовлетворит.	22	17. Песок мягкий	60-150
9. Щебень в плохом состоян.	37	18. Песок, дюны	160-300

- 1.2. Количество ведущих колес z ;
- 1.3. Максимальный вес машины GVW — gross (loaded) vehicle weight, H ;
- 1.4. Максимальный вес W , приходящийся на одно ведущее колесо (weight over each drive wheel), H ;
- 1.5. Радиус колеса по шине r , m ;
- 1.6. Требуемое ускорение v/t [m/c^2] — разгон до заданной максимальной скорости v [$км/ч$] за время t [c];
- 1.7. Максимальная скорость машины v , $км/ч$;
- 1.8. Максимальный угол подъема машины, %;
- 1.9. Характеристика покрытия;
- 1.10. Передаточное отношение редуктора i между гидромотором и ведущим колесом (при необходимости установки редуктора).

2. Расчет максимальной частоты вращения гидромотора. Максимальную частоту вращения гидромотора, обеспечивающую максимальную транспортную скорость машины, определяют по формуле

$$n_{\max} = \frac{10^3}{60} \cdot i \cdot \frac{v_{\max}}{\pi \cdot d_b} = 2,65 \cdot i \cdot \frac{v_{\max}}{r}, \text{ мин}^{-1}, \quad (1)$$

где v — максимальная транспортная скорость машины, $км/ч$; d_b и r — диаметр и радиус ведущего колеса, соответственно, m ; i — передаточное отношение редуктора между гидромотором и ведущим колесом ($i = 1$ при безредукторном приводе).

3. Расчет максимального крутящего момента, развиваемого гидромотором.

Для выбора рабочего объема гидромотора необходимо определить предварительно максимальное тяговое усилие, которое зависит от ряда факторов

$$F_{\sum TE} = F_{RR} + F_{GR} + F_{FA} + F_{DP}, H, \quad (2)$$

где F_{RR} — сила, необходимая для преодоления сопротивления качения между колесом и грунтом, H ; F_{GR} — сила, необходимая для преодоления подъема, H ; F_{FA} — сила, требуемая для обеспечения ускорения, H ; F_{DP} — сила, требуемая для буксировки других транспортных средств или оборудования (drawbar pull required), H .

3.1. Силу, необходимую для преодоления сопротивления качения между колесом и грунтом, определяют по формуле

$$F_{RR} = 10^{-3} f_{RR} \cdot GVW, H, \quad (3)$$

где f_{RR} — коэффициент сопротивления между колесом и грунтом (rolling resistance), значение которого приведены табл. 2.

3.2. Силу, необходимую для преодоления максимального угла подъема, рассчитывают по формуле

$$F_{GR} = 10^{-2} GR \cdot GVW, H, \quad (4)$$

где GR — градиент [%], определяемый как произведение угла наклона α на 100%

$$GR = \alpha \cdot 100, \%. \quad (5)$$

3.3. Силу, необходимую для обеспечения требуемого ускорения, рассчитывают по формуле

$$F_{FA} = \frac{10^3 v \cdot m}{3600 \cdot t} = \frac{10^3 v \cdot GVW}{3600 \cdot t \cdot g} = \left[\frac{10^3 \text{ мЧНЧс}^2}{3600 \text{ с}^2 \cdot 9,81 \cdot \text{м}} \right] = \frac{v \cdot GVW}{35,32 \cdot t}, H, \quad (6)$$

где t — промежуток времени [c], за который достигается максимальная скорость v [$км/ч$] движения машины (а отношение v/t является ускорением); m — масса машины, определяемая как отношение максимального веса GVW к ускорению свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

$$m = \frac{GVW}{g} \left[\frac{H \cdot c^2}{M} \right], \text{ кг}. \quad (7)$$

3.4. Определение дополнительной силы, требуемой для буксировки других транспортных средств или оборудования (Drawbar pull required). Если известна масса (вес) буксируемого груза, то силу определяют по формулам, приведенным в пп. 3.1–3.3.

3.5. Определяют суммарную силу по формуле (2). Следует отметить, что для низкоскоростных транспортных средств сопротивлением воздуха пренебрегают.

3.6. Крутящий момент гидромотора определяют по формуле

$$M_m = \frac{F_{\sum TE} \cdot r}{z \cdot i}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (8)$$

где Z — число гидромоторов привода хода в мобильной машине, шт.

3.7. Момент буксования (wheel slip) определяют по формуле

$$M_{TS} = \frac{W \cdot f \cdot r}{i}, \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (9)$$

где W — максимальная нагрузка (вес), приходящаяся на гидромотор, H ; f — коэффициент трения, значение которого зависит от материала контртел:

$f = 0,3$ — для трения сталь по стали;

$f = 0,5$ — для трения резиновой шины по грунту;

$f = 0,6-0,8$ — для трения резиновой шины по твердой поверхности;

$f = 0,7$ — для трения резиновой шины по цементному покрытию (бетону).

4. Определение радиальной нагрузки на вал гидромотора.

При использовании гидромотора в качестве мотор-колеса, когда на его вал действует радиальная нагрузка, необходимо произвести выбор гидромотора по каталогу с учетом обеспечения его функционирования при заданной максимальной нагрузке и требуемой долговечности. Расчет радиальной нагрузки крайне важен, исходя из необходимости обеспечения гидромотором требуемой долговечности, зависящей от выбранного типоразмера и конструктивного исполнения, в частности, используемых в конструкции гидромотора подшипников качения вала.

Полную радиальную нагрузку, действующую на вал гидромотора, определяют по формуле

$$F_{RL} = \sqrt{W^2 + \left(\frac{M_m}{r}\right)^2}, \text{ Н}. \quad (10)$$

5. Выбор конструктивного исполнения и типоразмера гидромотора по рабочему объему осуществляется по каталогам фирмы WHITE HYDRAULICS на основе полученных расчетных данных по максимальным значениям частоты вращения, крутящего момента и радиальной нагрузки, действующей на вал.

Рассмотрим пример расчета гидромотора для гидропривода со следующими исходными данными:

1.1. Колесная формула (общее количество колес — 4);

1.2. Количество ведущих колес $z = 2$;

1.3. Максимальный вес машины $G_{VW} = 7000 \text{ Н}$;

1.4. Максимальный вес, приходящийся на одно ведущее колесо $W = 1750 \text{ Н}$;

1.5. Радиус колеса по шине $r = 0,406 \text{ м}$ (или 16");

1.6. Требуемое ускорение v/t [$\text{м}/\text{с}^2$] — разгон до заданной максимальной скорости $v_{\text{макс}} = 8 \text{ км}/\text{час}$ за время $t = 10 \text{ с}$;

1.7. Максимальный угол подъема машины, 20 %;

1.8. Характеристика покрытия — плохой асфальт;

1.9. Передаточное отношение между гидромотором и ведущим колесом $i = 1$.

Полученные в примере расчета значения параметров тягового усилия и соотношение составляющих сил приведены в таблице 3.

Таблица 3
Соотношение сил при расчете тягового усилия гидромотора

Усилие	$F_{\sum TE}$	F_{RR}	F_{GR}	F_{FA}	F_{DP}
Значение, H	1712,55	154	1400	58,55	0
Соотношение, %	100	9	81,7	9,3	0

Развиваемый гидромотором крутящий момент должен быть не менее $M_m = 347,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$, момент буксования составляет $M_{TS} = 426,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$, максимальная частота вращения $n_{\text{макс}} = 52,2 \text{ мин}^{-1}$, а максимальная радиальная нагрузка на вал гидромотора составляет $F_{RL} = 1948,26 \text{ Н}$.

Таким образом, основной силой является сила F_{GR} , необходимая для перемещения машины на подъеме, а сумма сил сопротивления грунта F_{RR} и необходимая для создания ускорения F_{FA} не превышают 20% от суммарной силы сопротивления $F_{\sum TE}$.

Из формулы (8) можно получить экстремальные значения тягового усилия, обеспечиваемые героторными гидромоторами. Например, при использовании четырех гидромотор-колес ($z = 4$) и при отказе от промежуточного редуктора между гидромотором и ступицей ведущего колеса ($i = 1$)

$$F_{\sum TE \text{ макс}} = 10^{-3} \frac{M_m \cdot z}{r}, \text{ кН}, \quad (11)$$

максимальное тяговое усилие составит порядка 33 кН при крутящем моменте в 3342 Н·м гидромотора серии ДТ с рабочим объемом 2100 см³ и применении 4-х гидромоторов (по два на каждую ось) и радиусе колеса $r = 0,4 \text{ м}$. При применении гидромоторов серии RS с рабочим объемом 50 см³ в машине с одним ведущим мостом тяговое усилие составит не более 0,5 кН.

Отметим, что максимальное тяговое усилие, создаваемое, например, четырьмя радиально-поршневыми гидромоторами многократного действия фирмы «POCLAIN HYDRAULICS» серии MS с рабочим объемом 15000 см³ [4], может достигать 300 кН при перепаде давлений 32 МПа (при $r = 1 \text{ м}$).

Базовая долговечность гидромоторов в 2000 часов обеспечивается при частоте вращения 100 мин⁻¹. В зависимости от реальной в эксплуатации (или так называемой «рабочей») частоты вращения долговечность гидромотора подлежит корректировке согласно таблицы 4.

Допускаемая в эксплуатации радиальная нагрузка

Таблиця 4

Изменение корректировочного коэффициента долговечности гидромотора в зависимости от отклонения от частоты вращения в 100 мин⁻¹

Частота вращения гидромотора, мин ⁻¹	50	100	200	300	400	500	600	700	800
Корректировочный коэффициент	1,23	1,0	0,81	0,72	0,66	0,62	0,58	0,56	0,5

на вал гидромотора зависит от частоты вращения и точки приложения нагрузки

$$F_{RL} = \frac{F_{RL_{\max}}}{n} \cdot \frac{25000}{95+L} [daH] = \frac{F_{RL_{\max}}}{n} \cdot \frac{250}{95+L}, \text{кН}, (12)$$

где $F_{RL_{\max}}$ — максимальная нагрузка на вал гидромотора (по каталогу), H , n — частота вращения гидромотора, мин⁻¹; L — расстояние от фланца гидромотора до точки приложения радиальной нагрузки F_{RL} на его вал, мм.

Выводы

1. Фирма «WHITE HYDRAULICS» в зависимости от требуемой долговечности привода вращения мобильной машины предлагает широкий выбор типоразмеров и конструктивных исполнений героторных гидромоторов.
2. Героторные гидромоторы фирмы «WHITE HYDRAULICS» могут быть использованы при проектировании и модернизации мобильных колесных машин с тяговым усилием в диапазоне от менее 0,5 до 33 кН.

3. Техническую поддержку в вопросах подбора, закупок и эксплуатации героторных гидромоторов фирмы «WHITE HYDRAULICS» обеспечивает представительство фирмы «BONDIOLI & PAVESI» в Украине — Кучер Василий Григорьевич — 0504374438; byryukr@tr.ukrtel.net или vasilykucher@mail.ru.

Литература

1. Гідроприводи об'ємні та пневмоприводи. Ч. 2. Об'ємні гідромашини та пневмомашини. Терміни та визначення: ДСТУ 3455.2-96. — [Чинний від 1998-01-01]. — К.: Держстандарт України, 1998. — 61 с.
2. WHITE HYDRAULICS. PRODUCTS. — PC999206. — 2р.
3. WHEEL MOTORS. SAI Crankshaft Design Radial Piston Hydraulic Motors. — MODENA (Italia). — 019241.5 — 28р.
4. POCLAIN HYDRAULICS THE HYDROSTATIC TRANSMISSION OF POWER. — 677777773H. Oct. 96. — 16р.

Надійшла 20.06.2011 р.