

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОУДАРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ ГОРНЫХ И СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Л.В. Городилов, Институт горного дела СО РАН, Россия

Представлен размерный анализ и разработанная на его основе и на результатах численных расчетов методика выбора основных параметров гидроударных систем. Приводится пример расчета параметров гидромолота ковша активного действия экскаватора ЭО-4124А.

Создание новых и совершенствование существующих технологий разрушения горных пород является актуальной научно-технической задачей. Перспективное направление здесь — использование горных машин с активными исполнительными органами (рис. 1): экскаваторов с навесными молотами [1] и с ковшом активного действия [2] для открытых горных работ и строительства, динамических стругов с гидроударными устройствами [3] и горнопроходческих комбайнов с навесными молотами — для подземных горных работ. Применение гидромолотов или гидроударных систем здесь по КПД и мощности не имеет альтернативы.



Рис. 1. Горные машины с активными исполнительными органами: *а* — экскаватор НІТАСНІ с навесным гидромолотом, *б* — экскаватор ЭКГ–5В с ковшом активного действия с тремя пневмомолотами, *в* — экспериментальный динамический струг, оснащенный тремя гидромолотами, *г* — проходческий комбайн ГПКС с пневмомолотом

Использование при этом серийно выпускаемых гидромолотов не всегда возможно, поэтому и в настоящее время существует проблема расчета, выбора параметров и проектирования таких устройств. Несмотря на значительный объем исследований в этом направлении, в основном относящийся к 50-80-м годам прошлого века, вряд ли ее можно считать решенной. Не существует и серийно выпускаемых молотов, которые бы по своим характеристикам не уступали зарубежным аналогам.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-08-00982)

В работе, с использованием результатов численного исследования гидроударных систем двухстороннего действия [4], разработана методика выбора необходимых для их проектирования параметров и характеристик по ограниченному набору заданных параметров и таблицам характеристик в пространстве динамических критериев подобия.

В расчетах [4] использовали модель гидроударной объемной системы с источником постоянного расхода (рис. 2), включающую ударное устройство УУ (боек и жестко закрепленный корпус), жесткий ограничитель (инструмент) O , газожидкостный аккумулятор $Ак$, двухпозиционный распределитель P , канал управления C и насос постоянной производительности H . Утечки жидкости определяются сопротивлением $r_0 = p_n / q_0(1 - \eta_0)$, где p_n , q_0 и η_0 — номинальное давление, идеальная подача и объемный КПД насоса. Гидравлическими потерями в ветвях системы, механическим трением в паре "корпус-боек" и затратами энергии на работу распределителя пренебрегаем.

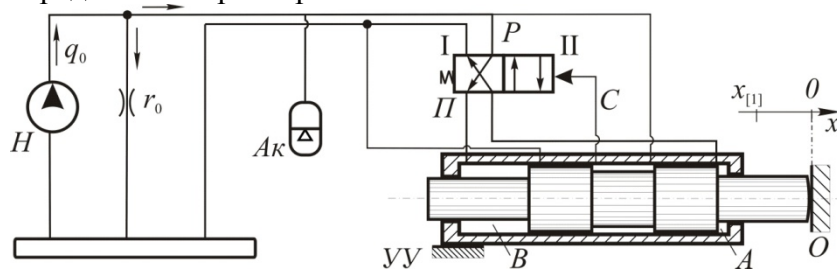


Рис. 2. Принципиальная схема гидроударной системы: H — насос, $Ак$ — аккумулятор, P — распределитель, $УУ$ — ударное устройство, O — ограничитель, Π — пружина; A и B — соответственно камеры обратного и прямого хода $УУ$, C — управляющая линия распределителя P (при координате бойка $x < x_{[1]}$ — C соединена со сливной линией, при $x = 0$ — с напорной, при $0 < x \leq x_{[1]}$ — замкнута)

Для данной модели набор размерных параметров, описывающих ее поведение, включает величины, представленные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Размерные параметры

Наименование	Обозначение	Размерность
Идеальная подача насоса	q_0	$\text{м}^3/\text{с}$
Гидравлическое сопротивление системы	r_0	$\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^5$
Масса бойка	m	кг
Площадь бойка со стороны камеры обратного хода	S_A	м^2
Площадь бойка со стороны камеры прямого хода	S_B	м^2
Длина фазы обратного хода бойка	x_1	м
Гидравлическая емкость аккумулятора ¹	$c = V_n / \gamma p_n^2$	$\text{м}^5/\text{Н}$

При размерном анализе, произведенном с применением метода аналогичности [5], переход к безразмерным переменным осуществляли по формулам

$$t = cr_0 \cdot \bar{t}, \quad x = \frac{cr_0 q_0}{S_B} \cdot \bar{x}, \quad v = \frac{q_0}{S_B} \cdot \bar{v}, \quad p = r_0 q_0 \cdot \bar{p}, \quad (1)$$

где величины t , x и v, p — соответственно размерные время, координата и скорость бойка, давление в аккумуляторе, с чертой — их безразмерные аналоги. В результате размерного анализа выбраны следующие критерии подобия:

$$\sigma_0 = \frac{S_A}{S_B}, \quad \sigma_1 = \frac{c r_0^2 S_B^2}{m}, \quad \bar{x}_{[1]} = \frac{S_B}{c r_0 q_0} \cdot x_{[1]}. \quad (2)$$

² γ — показатель адиабаты газа в аккумуляторе, V_n — объем аккумулятора при номинальном давлении

При расчетах предельных циклов системы, вычисляли интегральные характеристики: предупредную скорость \bar{v}_I^* ³ и размах колебаний \bar{x}_{\max}^* бойка, время цикла \bar{t}_C^* , мощность \bar{N}^* и КПД η^* , среднее \bar{p}_m^* и максимальное \bar{p}_{\max}^* давление за цикл. Их размерные аналоги, являющиеся функциями критериев (2) можно рассчитать по формулам

$$v_I^* = \bar{v}_I^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1) \cdot \frac{q_0}{S_B}, \quad t_C^* = \bar{t}_C^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1) \cdot cr_0, \quad x = \bar{x}(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1) \cdot \frac{cr_0 q_0}{S_B}, \quad (3)$$

$$N^* = \bar{N}^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1) \cdot r_0 q_0^2, \quad p_m^* = \bar{p}_m^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1) \cdot r_0 q_0, \quad p_{\max}^* = \bar{p}_{\max}^*(\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1) \cdot r_0 q_0. \quad (4)$$

В уравнения (2) входят собственно критерии $\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1$, а также размерные параметры (таблица 1). Выбирая произвольным образом точку в пространстве критериев подобия, мы задаем значения критериев подобия и вместе с тем, по результатам расчетов [4], получаем набор соответствующих этой точке безразмерных интегральных характеристик, входящих в формулы (3), (4).

Таким образом, имеем девять уравнений (2)–(4) относительно тринадцати неизвестных размерных параметров и характеристик системы. Чтобы получить решение и вычислить все параметры и характеристики необходимо задать значения четырех из них.

Приведем одну из возможных схем расчета В качестве заданных примем параметры

$$q_0, r_0, m, x_1 \quad (5)$$

(можно взять и другие четыре параметра или характеристики). Этот набор вместе с выбранной в пространстве безразмерных критериев подобия точкой $\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1$ позволяет однозначно решить систему уравнений (2)–(4) относительно неизвестных параметров S_B, S_A, c

$$S_B = \sqrt[3]{\frac{m \sigma_1 \bar{x}_{[1]} q_0}{r_0 x_{[1]}}}, \quad S_A = \sigma_0 S_B, \quad c = \frac{x_{[1]} S_B}{\bar{x}_{[1]} r_0 q_0} \quad (6)$$

и характеристик $v_I^*, t_C^*, x_{\max}^*, N^*, p_m^*, p_{\max}^*$.

По полученным данным можно рассчитать объем аккумулятора при номинальном давлении $V_n = c \cdot \eta_n$ и максимально возможное усилие отдачи $Q_{\max}^* = \bar{p}_{\max}^* r_0 q_0 \cdot S_B$ в предельном цикле.

Таким образом, задав набор параметров (5), для любой строки таблицы безразмерных критериев подобия $\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_1$ и интегральных характеристик предельных циклов $\bar{v}_I^*, \bar{x}_{\max}^*, \bar{t}_C^*, \bar{N}^*, \bar{p}_m^*$ и \bar{p}_{\max}^* можно по формулам (6), (3), (4) определить наборы основных размерных геометрических и физических параметров системы, из которых затем выбрать наиболее подходящий вариант. Выбор осуществляется по ограничениям и требованиям, предъявляемым к ударному устройству, например, по предупредной скорости v_I^* , размаху колебаний x_{\max}^* , объему аккумулятора при заданном давлении V_0^* и т.д.

На языке C++ была разработана программа расчета и вывода в файлы последовательного доступа таблиц критериев подобия и соответствующих им безразмерных выходных характеристик предельных циклов объемных гидроударных систем двухстороннего действия. Таблицы импортировали в программу Microsoft Excel 2007, в которой был реализован алгоритм выбора (рис. 3): вычисление по формулам (6), (3), (4) значений неизвестных параметров и размерных характеристик и затем, при помощи "Числового фильтра" выбор строк, соответствующих накладываемым на устройство ограничениям. Например, на листе Excel, изображенном на рис. 3, на размах колебаний бойка x_{\max}^* (заголовок столбца xMax) наложено ограничение, при котором в таблице отображаются только строки, в которых эта характеристика меньше 0.085 м. Столбцы с безразмерными характеристиками и заданными параметрами на листе рис. 3 скрыты.

³ Надстрочный индекс «*» означает, что данная характеристика относится к предельному циклу

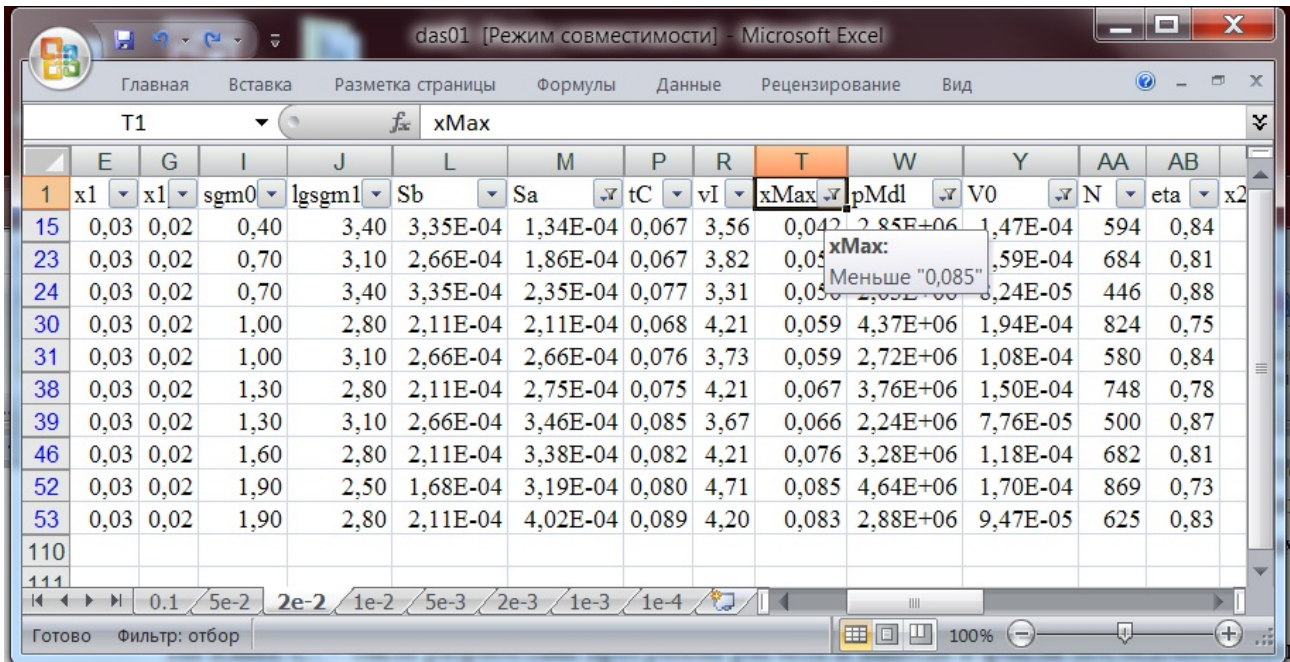


Рис. 3. Окно программы Microsoft Excel

Для иллюстрации приведенной методики приведем пример расчета параметров гидромота, предназначенного для работы в группе из трех ударных устройств ковша активного действия экскаватора ЭО-4124А. В качестве заданных (5) принимали величины:

$$q_0 = 1.1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с} \text{ (~} 1/3 \text{ от полной подачи насоса экскаватора)}, r_0 = 5.0 \cdot 10^{10} \text{ Па} \cdot \text{с} / \text{м}^3, \\ m = 30 \text{ кг}, x_1 = 0.05 \text{ и } 0.08 \text{ м}.$$

Расчет безразмерных характеристик (3), (4) был произведен для сетки значений критериев подобия:

$$\bar{x}_1 = 0.1, 0.05, 0.02, 0.01, \dots, 10^{-4}; \sigma_0 = 0.1, 0.4, \dots, 1.9; \lg \sigma_1 = 1, 1.3, \dots, 7.$$

Из примерно тысячи полученных наборов данных, по неравенствам-ограничениям:

$$7.5 \text{ м/с} < v_l^* < 8.5 \text{ м/с}; p_{\max}^* < 27 \text{ МПа}; S_A \geq 2.0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; x_{\max}^* < 0.15 \text{ м}; V_0 < 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

было отобрано одиннадцать, представленных в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчета параметров ударной системы

$x_1, \text{ см}$	$\bar{x}_{[1]}$	σ_0	$\lg \sigma_1$	$S_B, \text{ см}^2$	$S_A, \text{ см}^2$	$t_C^*, \text{ с}$	$v_l^*, \text{ м/с}$	$x_{\max}^*, \text{ м}$	$p_m^*, \text{ МПа}$	$V_0, \text{ л}$	$N^*, \text{ кВт}$	η^*
0.05	0.05	0.70	1.90	3.74	2.62	0.057	7.6	0.084	27.0	0.46	15.1	0.51
0.05	0.05	1.00	1.90	3.74	3.74	0.061	7.8	0.098	24.0	0.38	14.9	0.56
0.05	0.05	1.30	1.90	3.74	4.87	0.065	7.9	0.111	21.5	0.31	14.5	0.60
0.05	0.05	1.60	1.60	2.97	4.76	0.069	8.3	0.126	26.1	0.34	15.0	0.51
0.05	0.05	1.60	1.90	3.74	5.99	0.070	8.1	0.124	19.5	0.26	14.0	0.63
0.05	0.05	1.90	1.90	3.74	7.11	0.075	8.2	0.137	17.6	0.22	13.5	0.65
0.08	0.05	0.40	2.80	6.38	2.55	0.083	7.6	0.110	12.2	0.32	10.4	0.78
0.08	0.05	0.70	2.50	5.07	3.55	0.084	8.0	0.132	14.2	0.33	11.5	0.74
0.05	0.10	1.60	1.60	3.75	5.99	0.069	7.9	0.118	18.1	0.11	13.6	0.63
0.05	0.10	1.90	1.30	2.98	5.65	0.071	8.3	0.132	22.7	0.13	14.6	0.54
0.05	0.10	1.90	1.60	3.75	7.12	0.073	7.9	0.128	15.9	0.09	12.8	0.66

⁴ V_0 – объем аккумулятора при давлении зарядки $p_0=12 \text{ МПа}$

Таким образом, на основе размерного анализа и численных расчетов характеристик предельных циклов автоколебательных гидроударных систем в пространстве динамических критериев подобия предложена методика определения набора их параметров и характеристик, необходимых на начальном этапе проектирования, по ограниченному набору заданных параметров и ограничениям на них.

Расчет по данной методике может служить начальным этапом определения параметров при проектировании гидроударной машины. После выбора из ряда полученных наборов данных наиболее подходящего возможно уточнение и оптимизация параметров с учетом конструктивных особенностей машины и детализацией свойств ее элементов.

В приведенной методике рассматривается один из возможных вариантов выбора параметров. На самом деле решение поставленной задачи также возможно, если в качестве заданных параметров выбрать любые другие четыре параметра или заменить некоторые из них интегральными характеристиками.

Часто экскаваторы имеют гидросистемы с насосами постоянной мощности. В этом случае математическая модель системы с источником постоянной подачи также применима, поскольку период колебаний гидроударной машины как правило существенно меньше времени переходных процессов в насосе. Методики выбора параметров при этом должна быть скорректирована с учетом изменения подачи насоса q_0 при изменении среднего давления в системе в течение предельного цикла p_m^* .

Список литературы

1. Алимов О.Д., Басов С.А. Гидравлические виброударные системы – М. : Наука, 1990. – 350 с.
2. Маттис А. Р и др. Экскаваторы с ковшом активного действия : опыт создания, перспективы применения – Новосибирск : Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 1996. – 174 с.
3. Горбунов В.Ф., Лазуткин А.Г., Ушаков Л.С. Импульсный гидропривод горных машин – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1986. – 195 с.
4. Городилов Л.В. Численное исследование динамики автоколебательных гидравлических ударных систем. Ч. I. Системы двойного действия // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 6. – С. 66–81.
5. Мамонтов М.А. Аналогичность. - Мин-во обороны СССР, 1971. - 60 с.