

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.231

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ГИДРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ ОДНОСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ С ДВУМЯ ОГРАНИЧИТЕЛЯМИ ДВИЖЕНИЯ БОЙКА

Л. В. Городилов

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: gor@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлена математическая модель автоколебательной гидроударной объемной системы одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка. Определены динамические критерии подобия системы: отношение жесткостей пружин аккумулятора и ударного узла; величина, пропорциональная отношению потенциальной энергии аккумулятора к кинетической энергии бойка при заданных параметрах источника; безразмерные координаты бойка, в которых происходит изменение позиций распределителя, его второго ограничителя и предварительный натяг пружины между бойком и корпусом ударного узла; коэффициент восстановления скорости бойка. В пространстве критериев подобия проведены численные расчеты, построены номограммы изолиний интегральных выходных параметров и осциллограммы динамических характеристик. Дан анализ динамики системы, выявлены закономерности ее поведения в широком диапазоне входных параметров. Установлены границы областей в пространстве критериев подобия, в которых реализуются одноударные, двухударные и многоударные предельные циклы.

Гидроударная система, предельный цикл, математическая модель, критерии подобия, выходные характеристики, реверсивный режим, ударная мощность

DOI: 10.15372/FTPRPI20200609

Один из признаков классификации гидроударных систем — характер формирования силового воздействия на ударную массу (или фазовые особенности передачи энергии от системы к бойку), по которому выделяют три класса систем: двухстороннего (двойного) и одностороннего прямого и обратного действия [1, 2]. Эта терминология встречается и в машиностроительной гидравлике, где также различают силовые цилиндры двухстороннего и одностороннего действия [3].

Исследование общих свойств гидроударных систем проводилось для трех классов. В [4] на основе результатов численных расчетов в широком диапазоне входных параметров (безразмерных унифицированных критериев подобия) выполнен сравнительный анализ динамики

и характеристик автоколебательных гидроударных систем двухстороннего и одностороннего прямого и обратного действия, выделены особенности их поведения, общие свойства и различия.

В связи со спецификой работы гидроударных систем рассмотрим системы прямого и обратного действия как один класс — систему одностороннего действия, если включить в модель два ограничителя движения бойка. При отсутствии одного из ограничителей (удалении его от ударной массы на бесконечно большое расстояние) получаем один из двух типов систем, а при наличии обоих — новый класс систем с особыми свойствами. В [5] в результате численных исследований автоколебательной гидроударной системы одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка установлено, что при неизменных параметрах ударного устройства в зависимости от расхода подаваемой к нему жидкости она может работать в нескольких режимах, в том числе совершать единичные удары в прямом или обратном направлении.

В данном случае получаем конструкцию реверсивного ударного устройства, которое может использоваться в горном деле при бурении скважин и проведении технологических операций в них, а также в строительстве и коммунальном хозяйстве при проходке каналов в грунтах. В этих технологических операциях происходит заклинивание буровых снарядов и специального оборудования [6, 7], что приводит к их потере и выходу из строя скважины и повышает стоимость работ. Применение реверсивного ударного устройства — эффективный способ решения данной проблемы, так как позволяет многократно увеличить прикладываемые к оборудованию для его освобождения силы вследствие особенностей ударного воздействия. В настоящей работе проведено системное исследование общих свойств объемной автоколебательной гидроударной системы одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка в широком диапазоне входных параметров.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ, ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Принципиальная схема исследуемой гидроударной системы на рис. 1 включает: насос H — источник постоянного расхода с подачей q_0 , номинальным давлением p_n и КПД η_0 (КПД в данном случае учитывает утечки в системе, определяемые сопротивлением $r_0 = p_n / (q_0(1 - \eta_0))$); бак T ; гидравлический пружинный аккумулятор энергии AK с жесткостью пружины c_{AK} и площадью поршня S_{AK} (массами поршня и пружины пренебрегаем); двухпозиционный распределитель P ; ударный узел — жестко заделанный корпус K и поршень-боек B массой m и площадью S_A со стороны камеры A ; пружину $П$ жесткостью c_m , связывающую корпус и боек; ограничители движения бойка O_1 и O_2 в правом и левом ограничителях соответственно.

Распределитель P имеет обратную связь с положением бойка B : при прохождении координат $-x_{[1]}$ и $-x_{[2]}$ он меняет позицию с I на II и обратно, позиции P определяют характер сил, действующих на боек. Считаем, что он переключается мгновенно и не создает потерь в системе.

Система работает следующим образом. В начальный момент распределитель P находится в позиции I, а боек B — на ограничителе O_1 . Управляющая линия распределителя $У$ через проточку в бойке соединена со сливной линией, а камера A ударного узла — с напорной. При включении насоса и подаче жидкости в напорную линию боек B под действием давления жидкости в камере A и силы со стороны пружины $П$ движется влево, доходит до координат $-x_{[2]}$ ($У$ отсоединяется от сливной линии) и $-x_{[1]}$ ($У$ соединяется с напорной линией), после

чего распределитель переходит в позицию II. Камера A соединяется со сливной линией, движение бойка B происходит под действием только силы упругости пружины Π . В этой фазе он замедляет скорость и может совершить удар об ограничитель O_2 . После остановки боек B движется вправо и ускоряется. При прохождении координат $-x_{[1]}$ и $-x_{[2]}$ управляющая линия $У$ последовательно отделяется от напорной и соединяется со сливной линией, распределитель возвращается в позицию I, а камера A сближается с напорной линией. Боек замедляет скорость и может совершить удар об ограничитель O_1 , а после остановки начинает движение влево, цикл повторяется.

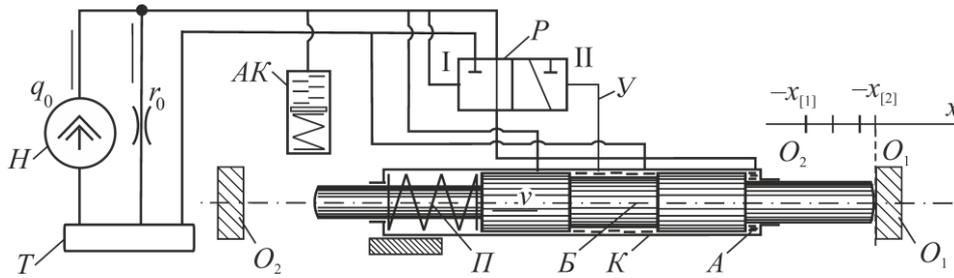


Рис. 1. Расчетная схема гидроударной системы с источником постоянного расхода: H — насос; T — бак; P — распределитель; K — корпус; B — поршень-боек; Π — пружина; AK — аккумулятор; O_1 и O_2 — ограничители движения бойка; r_0 — гидравлическое сопротивление

Параметры элементов системы считаем сосредоточенными, жидкость — несжимаемой, утечки в системе определяются линейным гидравлическим сопротивлением r_0 , механические и гидравлические потери отсутствуют, распределитель переключается мгновенно и без потерь, коэффициент восстановления скорости бойка при взаимодействии с ограничителем равен R .

Динамики бойка и аккумулятора в данной модели описываются уравнениями [8]

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad m \frac{dv}{dt} = -c_m x + c_m x_3 - S_{(J)} p, \quad c_h \frac{dp}{dt} = q_0 - \frac{p}{r_0} + S_{(J)} v, \quad (1)$$

начальными условиями

$$t = 0, \quad x = x_0, \quad v = v_0 \quad (2)$$

и условиями сопряжения решений в точках припасовки

$$x = -x_{[1]}, \quad v < 0 \quad \text{— I} \rightarrow \text{II}; \quad x = -x_{[2]}, \quad v > 0 \quad \text{— II} \rightarrow \text{I}; \quad x = 0, \quad v > 0$$

$$\text{или } x = x_{O_2}, \quad v < 0 \quad \text{— } v_+ = -Rv_-, \quad (3)$$

где x и v — координата и скорость бойка; p — давление в аккумуляторе; t — время; x_3 — предварительный натяг пружины; $S_{(J)} = S_A$, если распределитель находится в позиции I, а $S_{(J)} = 0$ — в позиции II; $c_h = S_{AK}^2 / c_{AK}$ — емкость пружинного аккумулятора; p / r_0 — утечки в системе при давлении p ; $x_{[1]}$ и $x_{[2]}$ — координаты изменения знака силы; R — коэффициент восстановления скорости бойка; v_- и v_+ — скорости бойка до и после удара.

Используя метод аналогичности [9], введем безразмерные переменные по формулам

$$t = r_0 c_h \cdot \bar{t}, \quad x = r_0 q_0 c_h / S_A \cdot \bar{x}, \quad v = q_0 / S_A \cdot \bar{v}, \quad p = r_0 q_0 \cdot \bar{p}.$$

Подставив их в (1)–(3), после преобразований получим:

$$\frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} = \bar{v}, \quad \frac{d\bar{v}}{d\bar{t}} = \sigma_1 \left[-\sigma_0(\bar{x} - \bar{x}_3) - \bar{S}_{(J)}\bar{p} \right], \quad \frac{d\bar{p}}{d\bar{t}} = 1 - \bar{p} + \bar{S}_{(J)}\bar{v}, \quad (4)$$

$$\bar{t} = 0, \quad \bar{x} = \bar{x}_0, \quad \bar{v} = \bar{v}_0, \quad (5)$$

$$\bar{x} = -\bar{x}_{[1]}, \quad \bar{v} < 0 \quad -I \rightarrow II; \quad \bar{x} = -\bar{x}_{[2]}, \quad \bar{v} > 0 \quad -II \rightarrow I; \quad \bar{x} = 0, \quad \bar{v} > 0$$

$$\text{или } \bar{x} = \bar{x}_{O_2}, \quad v < 0 \quad - \quad \bar{v}_+ = -R\bar{v}_-, \quad (6)$$

где $\sigma_0 = \frac{c_m c_h}{S_A^2}$, $\sigma_1 = \frac{r_0^2 q_0^2 c_h}{m(q_0 / S_A)^2}$, $\bar{S}_{(J)} = 1$, если распределитель находится в позиции I, а $\bar{S}_{(J)} = 0$ — в позиции II.

Динамика рассматриваемой системы определяется безразмерными параметрами — динамическими критериями подобия

$$\sigma_0, \sigma_1, \bar{x}_{[1]}, \bar{x}_{[2]}, \bar{x}_{O_2}, \bar{x}_3, R. \quad (7)$$

ПРОЦЕДУРА ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Для решения системы (4)–(6) разработана программа на языке C++. Уравнения интегрировались численно методом Рунге–Кутты с контрольным членом Егорова [10]. Согласование решений в точках сопряжения проводилось методом припасовывания [11]. Расчет выполнялся до входа системы в предельный автоколебательный цикл, что определялось по выполнению условия

$$|\bar{v}_{(I \rightarrow II)}^{(i)} - \bar{v}_{(I \rightarrow II)}^{(i-1)}| < 10 \cdot \varepsilon,$$

где $\bar{v}_{(I \rightarrow II)}^{(i)}$, $\bar{v}_{(I \rightarrow II)}^{(i-1)}$ — скорости бояка в момент переключения распределителя из I во II позицию соответственно i -го и $i-1$ -го циклов; $\varepsilon = 10^{-6}$ — локальная точность решения дифференциальных уравнений.

В пространстве критериев (7) численно исследовали динамику и выходные характеристики предельных циклов системы: предупредную скорость \bar{v}_I^* , частоту \bar{f}^* , ударную мощность \bar{N}^* и среднее давление за цикл \bar{p}_m^* :

$$\bar{v}_I^* = S_A / q_0 \cdot v_I^*, \quad \bar{f}^* = 1 / r_0 c_h \cdot f^*, \quad \bar{N}^* = 1 / 2 \cdot \bar{f}^* (\bar{v}_{I+}^* + \bar{v}_{I-}^*)^2 \quad \text{и} \quad \bar{p}_m^* = 1 / r_0 q_0 \cdot p_m^*, \quad (8)$$

здесь \bar{v}_{I+}^* и \bar{v}_{I-}^* — предупредные скорости бояка в предельном цикле при взаимодействии с правым и левым ограничителями соответственно (надстрочный индекс * означает принадлежность характеристики к предельному циклу).

Необходимое условие начала работы системы (боек начинает движение из исходного положения) — выполнение неравенства

$$\sigma_0 \bar{x}_3 - \bar{p}_{\max} < 0,$$

\bar{p}_{\max} — максимально возможное давление в системе, например давление открытия переливного клапана. Принимается $\bar{p}_{\max} = 0.3$. Расчеты проведены в диапазоне критериев подобия: $\sigma_0 = 10^{-1.1} - 10^3$, $\sigma_1 = 10^{2.5} - 10^8$, $\bar{x}_{O_2} = 5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-1}$.

При анализе результатов использовались изолинии выходных характеристик предельных циклов, построенные в сечениях $\sigma_0\sigma_1$ пространства критериев в области, ограниченной изолиниями минимального $\bar{p}_{\min} = 0.01$ и максимального $\bar{p}_{\max} = 0.3$ давлений и линией, отделяющей область одноударных циклов от области многоударных циклов, а также теоретические осциллограммы предельных циклов (ОД-области).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для иллюстрации результатов исследований на рис. 2 представлены построенные в пределах ОД-областей номограммы изолиний выходных характеристик системы при безразмерных параметрах (7), равных $\bar{x}_{O_2} = 0.001, 0.01, 0.1$, $\bar{x}_{[1]} = 0.7 \cdot \bar{x}_{O_2}$, $\bar{x}_{[2]} = 0.3 \cdot \bar{x}_{O_2}$, $\bar{x}_3 = 0.2 \cdot \bar{x}_{O_2}$, $R = 0$. Изолинии отрицательных скоростей означают удары по левому ограничителю, положительных — по правому. Протяженность ОД-области по координате σ_1 определяется \bar{x}_{O_2} : при росте до ~ 0.05 она уменьшается как $\sim 1/\bar{x}_{O_2}$ (рис. 2а, б), затем эта закономерность нарушается (рис. 2в) и при $\bar{x}_{O_2} > 0.1$ происходит ее вырождение. Объяснение этому такое же, как для гидроударных систем с одним ограничителем [4], в которых подобная закономерность наблюдается при изменении $\bar{x}_{[1]}$. На рис. 2 критерий \bar{x}_{O_2} пропорционален $\bar{x}_{[1]} - \bar{x}_{[2]}$.

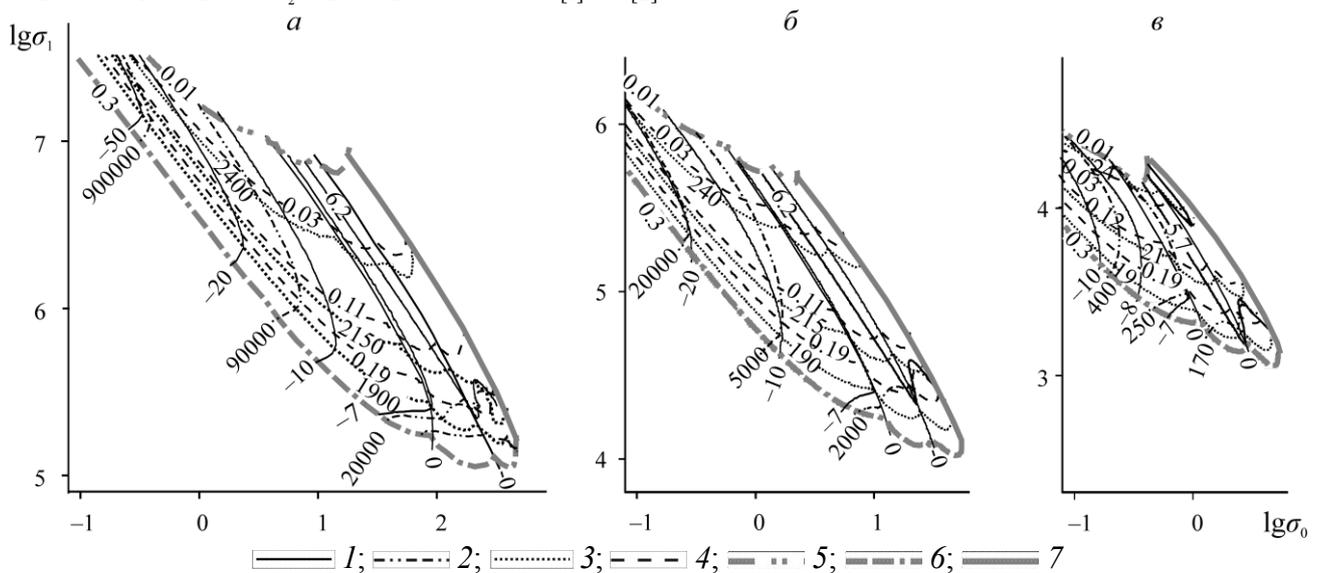


Рис. 2. Номограммы изолиний выходных характеристик в сечениях $\sigma_0\sigma_1$ пространства безразмерных критериев подобия плоскостями $\bar{x}_{O_2} = 0.001$ (а); 0.01 (б); 0.1 (в), $\bar{x}_{[1]} = 0.7 \cdot \bar{x}_{O_2}$, $\bar{x}_{[2]} = 0.3 \cdot \bar{x}_{O_2}$, $\bar{x}_3 = 0.2 \cdot \bar{x}_{O_2}$, $R = 0$): 1 — скорость \bar{v}_I^* ; 2 — мощность \bar{N}^* ; 3 — частота \bar{f}^* ; 4, 5 и 6 — среднее \bar{p}_m^* , минимальное \bar{p}_{\min}^* и максимальное \bar{p}_{\max}^* давление за предельный цикл соответственно; 7 — граница между областями одноударных и многоударных циклов

Представленную ОД-область можно разделить на три части: слева от изолинии предупредной скорости $\bar{v}_I^* = 0$ расположена область одноударного цикла с ударами бойка по левому ограничителю, справа от $\bar{v}_I^* = -0$ — область одноударного цикла с ударами бойка по правому ограничителю, между изолиниями — область двухударного цикла с ударами бойка по обоим ограничителям (рис. 1). Справа от линии 7 находится область многоударных циклов с ударами в прямом направ-

лении, которая в работе не исследовалась. Изолинии среднего давления и частоты ударов при пересечении изолиний скоростей с нулевыми значениями изменяют свое направление, что вызвано изменением характера диссипации энергии в системе при переходе от одноударных режимов к двухударному и обратно.

Увеличение \bar{x}_{O_2} от 0.001 до 0.1 ведет к снижению абсолютных значений безразмерной предударной скорости \bar{v}_l^* (наибольшему для одноударного режима с ударами в обратном направлении), сильному уменьшению частоты \bar{f}^* , пропорциональному \bar{x}_{O_2} , и ударной мощности \bar{N}^* системы. Теоретические осциллограммы динамических характеристик предельных циклов исследуемой системы, рассчитанные для точек сечения $\bar{x}_{O_2} = 0.01$ (рис. 2б), представлены на рис. 3.

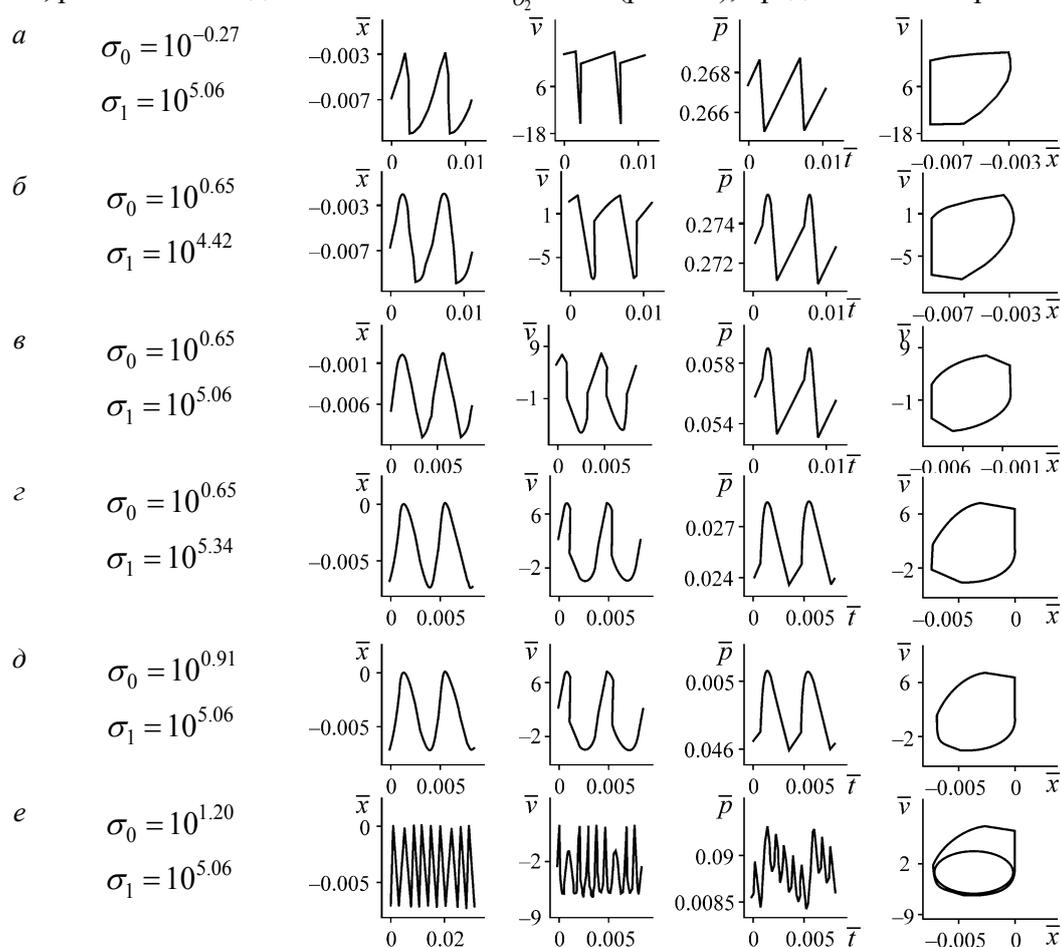


Рис. 3. Теоретические осциллограммы координаты \bar{x} , скорости бойка \bar{v} , давления в аккумуляторе \bar{p} , фазовой кривой $\bar{v} - \bar{x}$ предельных циклов ($\bar{x}_{[1]} = 0.007$, $\bar{x}_{[2]} = 0.003$, $\bar{x}_3 = 0.002$, $\bar{x}_{O_2} = 0.01$) для различных значений σ_0 , σ_1

В зависимости от положения точки в плоскости $\sigma_0 \sigma_1$ изменяются форма и динамические характеристики в течение цикла, а также режим работы. Слева от изолинии $\bar{v}_l^* = 0$ наблюдаются одноударные циклы с ударами бойка о левый ограничитель (рис. 3а, б), справа от изолинии $\bar{v}_l^* = -0$ — одноударные циклы с ударами бойка о правый ограничитель (рис. 3г, д) и многоударные циклы (рис. 3е), а между этими изолиниями — двухударные циклы (рис. 3в).

На рис. 4а–в приведены теоретические осциллограммы динамических характеристик предельных циклов, рассчитанные для сечения $\bar{x}_{O_2} = 0.001$ (рис. 2а), а на рис. 4г–е — для сечения $\bar{x}_{O_2} = 0.1$ (рис. 2в). Анализ их формы и характеристик, за исключением координаты \bar{x} и времени \bar{t} , в сходственных точках (расположенных одинаково относительно границ ОД-областей в плоскостях $\sigma_0\sigma_1$) показывает, что они сопоставимы (см. попарно рис. 3б, 4а, г; 3в, 4б, д; 3з, 4в, е). Масштабы координаты и времени пропорциональны \bar{x}_{O_2} . Для определения общих закономерностей поведения системы во всем пространстве безразмерных критериев подобия (7) на начальном этапе возможно рассмотреть ее поведение в одном из сечений $\bar{x}_{O_2} = \text{const}$.

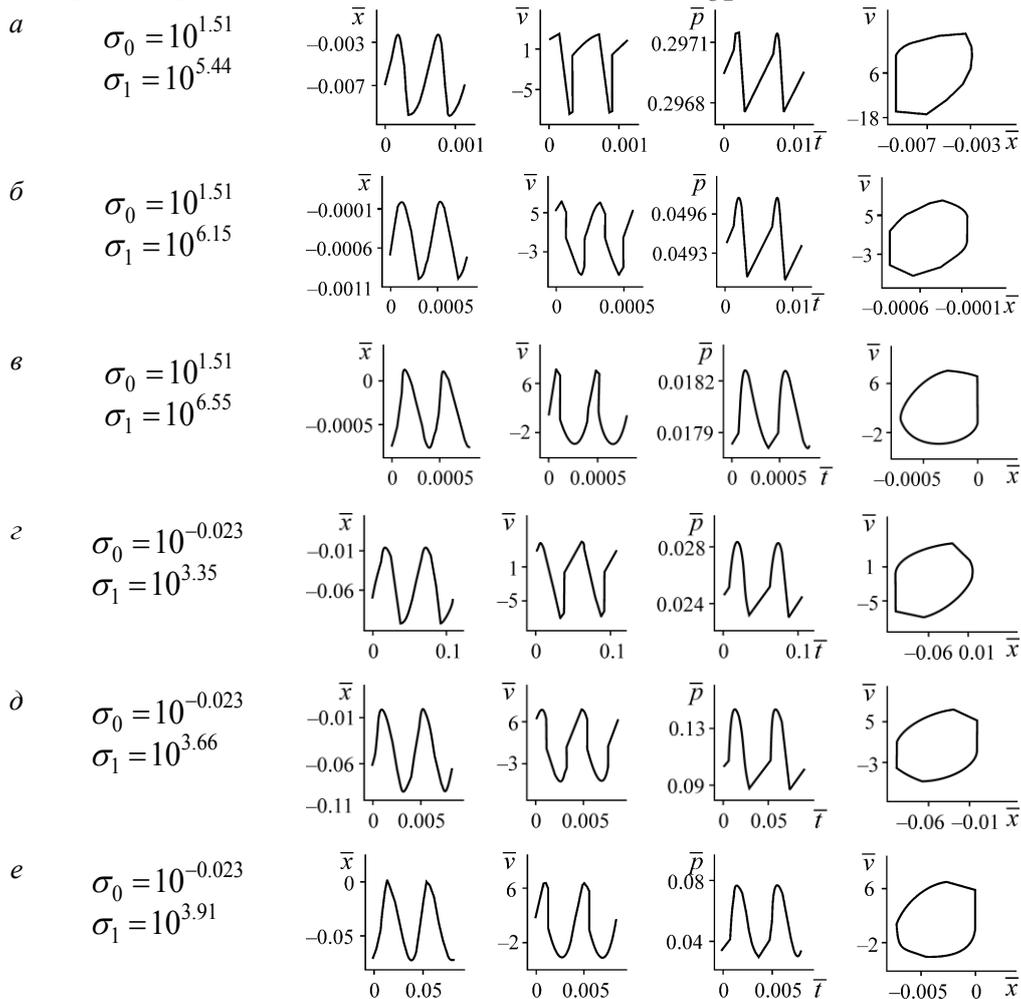


Рис. 4. Теоретические осциллограммы координаты \bar{x} , скорости бойка \bar{v} , давления в аккумуляторе \bar{p} , фазовой кривой $\bar{v} - \bar{x}$ предельных циклов ($\bar{x}_{[1]} = 0.007$, $\bar{x}_{[2]} = 0.003$, $\bar{x}_3 = 0.002$, $\bar{x}_{O_2} = 0.01$) для различных значений σ_0 , σ_1 в сечении: а–в — $\bar{x}_{[1]} = 0.0007$, $\bar{x}_{[2]} = 0.0003$, $\bar{x}_3 = 0.0002$, $\bar{x}_{O_2} = 0.001$; г–д — $\bar{x}_{[1]} = 0.07$, $\bar{x}_{[2]} = 0.03$, $\bar{x}_3 = 0.02$, $\bar{x}_{O_2} = 0.1$

Далее представлены номограммы характеристик исследуемой системы в сечении безразмерного пространства критериев подобия плоскостью $\bar{x}_{O_2} = 0.01$, иллюстрирующие ее поведение при изменении безразмерного предварительного натяга \bar{x}_3 (рис. 5а, б) и координат $\bar{x}_{[1]}$

и $\bar{x}_{[2]}$, при которых происходит смена позиции распределителя (рис. 5в–е). Изменение безразмерного предварительного натяга \bar{x}_3 пружины от 0 до 0.8 приводит к сжатию ОД-области по осям σ_0 , σ_1 и подъему по оси σ_1 (рис. 2б, 5а, б). Предударные скорости \bar{v}_I^* бояка снижаются в обратном направлении и повышаются в прямом. Возрастает относительная величина области, в которой наблюдается режим работы с ударами бояка в прямом направлении. Это связано с ростом силы, действующей на боек со стороны пружины, при увеличении параметра \bar{x}_3 . Для ее преодоления при одинаковых остальных параметрах требуется создание более высоких давлений в системе, что и приводит к сжатию ОД-области и повышению динамических свойств системы (предударных скоростей \bar{v}_I^* , частоты \bar{f}^* и мощности системы \bar{N}^*).

При уменьшении расстояния между координатами бояка, при которых происходит переключение распределителя с фазы прямого хода на обратный $\bar{x}_{[2]}$ и с фазы обратного хода на прямой $\bar{x}_{[1]}$, также повышаются динамические свойства системы: ОД-область смещается вверх по координате σ_1 ; увеличиваются предударные скорости \bar{v}_I^* (в ~ 1.5 раза), частоты ударов \bar{f}^* (в 3 раза) и мощность (более чем в 3 раза). Относительный размер области двухударного режима уменьшается, а режима с ударами бояка в прямом направлении — увеличивается, что оказывается положительным фактором при настройке системы на требуемый режим работы.

Номограммы, иллюстрирующие изменение ОД-области и выходных характеристик системы при смещении положения координат $\bar{x}_{[1]}$, $\bar{x}_{[2]}$ ($\bar{x}_{[1]} - \bar{x}_{[2]} = \text{const}$) относительно центра отрезка O_1O_2 , представлены на рис. 2б, 5д, е. Смещение влево от $\bar{x}_{[1]} = 0.5$, $\bar{x}_{[2]} = 0.1$ к 0.7, 0.3 и 0.9, 0.5 приводит к небольшому сжатию со смещением влево и вверх ОД-области по осям σ_0 , σ_1 (рис. 1). Уменьшаются абсолютные и относительные величины подобластей, в которых наблюдаются двухударный и одноударный в прямом направлении цикла режимы. Снижаются предударные скорости \bar{v}_I^* в прямом и обратном направлении, создаются неблагоприятные условия для настройки системы на требуемый режим работы.

Рассмотрим применение результатов проведенных расчетов для конкретного ударного устройства. Выражение для критерия σ_1 можно представить в виде $\sigma_1 = k \cdot 1/q_0^2$, где $k = p_n^2 S_A^2 c_h / m(1 - \eta_0)^2$, т. е. $\sigma_1 \sim 1/q_0^2$. Остальные критерии (7) не зависят от расхода q_0 . При изменении q_0 и фиксированных остальных параметрах изменяется только критерий σ_1 , и, как следует из рис. 2, возможно получение всех исследуемых режимов работы системы.

Следуя алгоритму [12], определим следующие параметры гидроударного устройства: $p_n = 12$ МПа, $\eta_0 = 0.7$, $m = 2.2$ кг, $x_{O_2} = 0.06$ м, $x_{[1]} = 0.042$ м, $x_{[2]} = 0.018$ м, $x_3 = 0.012$ м, $S_A = 2.14$ см², $c_{mA} = 6.35$ Н/мм, $S_{AK} = 5.47$ см², $c_{mAK} = 9.35$ Н/мм, которые при расходе $q_0 = 13.2$, 5.76 и 4.2 л/мин дают безразмерные критерии подобия, соответствующие тем, при которых рассчитывались теоретические осциллограммы (рис. 3б–е). В таблице представлены результаты расчета характеристик предельных циклов системы, выполненного по таблицам численных расчетов, по которым проводилось построение изолиний рис. 2б с применением формул (8).

ВЫВОДЫ

В результате размерного анализа определены основные критерии подобия гидроударной системы одностороннего действия с двумя ограничителями движения бойка. В дополнение к критериям, определенным для системы с одним ограничителем, к ним также относятся безразмерные координаты вторых ограничителей движения бойка и точки, в которой происходит изменение позиции распределителя.

Численное исследование динамики и выходных характеристик системы при изменении в широком диапазоне входных параметров подтвердило наличие четырех режимов ее работы: одноударных с ударами бойка в прямом и обратном направлении, двухударных с ударами бойка в обоих направлениях и многоударных, в которых картина процесса повторяется после нескольких ударов в прямом направлении.

Исследование влияния безразмерных координат второго ограничителя \bar{x}_{0_2} и координат бойка, при которых происходят переключения распределителя $\bar{x}_{[1]}$, $\bar{x}_{[2]}$, показало, что наиболее эффективно управлять свойствами системы можно с помощью изменения разности $\bar{x}_{[1]} - \bar{x}_{[2]}$. Ее снижение ведет к уменьшению области двухударного режима и росту динамических показателей системы: предупредительной скорости, частоты ударов и мощности, что связано с сокращением объема рабочей камеры устройства, который определяется величиной $(x_{[1]} - x_{[2]})S_A$, пропорциональной при заданных параметрах источника и аккумулятора разности $\bar{x}_{[1]} - \bar{x}_{[2]}$. Изменение характеристик и режима работы ударного устройства с двумя ограничителями возможно с помощью изменения расхода жидкости и регулирования координат бойка, при которых происходит соединение гидравлической камеры устройства с напорной и сливной линиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов О. Д., Басов С. А. Гидравлические виброударные системы. — М.: Наука, 1990. — 350 с.
2. Ясов В. Г. Теория и расчет рабочих процессов гидроударных буровых машин. — М.: Недра, 1977. — 152 с.
3. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. — М.: Машиностроение, 1971. — 672 с.
4. Городилов Л. В. Анализ динамики и характеристик основных классов автоколебательных гидроударных систем объемного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2018. — № 1. — С. 22–30.
5. Gorodilov L. Analysis of self-oscillating single-acting hydro-impact system operational modes with two limiters of striker movement, Int. J. Fluid Power, 2019, Vol. 20, No. 2. — P. 209–224.
6. Манжосов В. К., Новиков Д. А. Моделирование переходных процессов и предельных циклов движения виброударных систем с разрывными характеристиками. — Ульяновск: УлГТУ, 2015. — 236 с.
7. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 137–142.
8. Городилов Л. В. Математические модели гидравлических ударных систем // ФТПРПИ. — 2005. — № 5. — С. 91–105.
9. Мамонтов М. А. Аналогичность. — М.: Изд-во МО СССР, 1971. — 46 с.

- 10. Арушанян, О. Б., Залеткин С. Ф.** Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 335 с.
- 11. Бесекерский В. А., Попов Е. П.** Теория систем автоматического регулирования. — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.
- 12. Городилов Л. В., Вагин Д., Распутина Т. Б.** Методика, алгоритм и программа выбора параметров гидроударных систем // ФТПРПИ. — 2017. — № 5. — С. 64–70.

Поступила в редакцию 15/IX 2020

После доработки 13/X 2020

Принята к публикации 03/XI 2020