

УДК 622.231

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИДРОУДАРНЫХ ОБЪЕМНЫХ СИСТЕМ
ДВУХСТОРОННЕГО ДЕЙСТВИЯ. Ч. II. ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПРЕДЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ УСТРОЙСТВ И
УСЛОВИЙ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГОРНЫМ МАССИВОМ**

Л. В. Городилов

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

В математическую модель гидроударной объемной системы двухстороннего действия включены параметры и элементы, учитывающие ее конструктивные особенности и условия взаимодействия с горным массивом. Проведены численные исследования их влияния на динамику и интегральные выходные характеристики предельных циклов.

Ударная система, автоколебания, предельный цикл, критерии подобия, характеристики

ВВЕДЕНИЕ

В [1] представлены результаты численных исследований объемных гидроударных систем двухстороннего действия с задержкой и без задержки движения бойка в пространстве основных критериев подобия. Это позволило выявить области данного пространства, в которых обеспечивается устойчивая работа систем, и в их пределах исследовать динамику и выходные характеристики предельных циклов. Однако эти исследования отражают лишь основные свойства системы. В реальных машинах появляются дополнительные, связанные с конструктивными особенностями и характером взаимодействия с горным массивом, которые могут существенно влиять на их поведение: сухое трение в паре “корпус – боек” ударного устройства, гидравлические сопротивления в ветвях гидросистемы, коэффициент восстановления скорости бойка и длина фазы прямого хода, при которой камера обратного хода соединена с напорной линией. Влиянию указанных параметров на выходные характеристики и динамику систем двухстороннего действия с задержкой и без задержки движения бойка посвящено настоящее исследование.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ

Отличие рассматриваемой нами системы от представленной в [1] заключается (рис. 1) в наличии механических потерь в паре “корпус – боек”, характеризуемых коэффициентом $S_f = Sf$ (S — площадь контакта соприкасающихся в течение работы поверхностей уплотняющих элемен-

тов и бойка; f — коэффициент трения), и гидравлических потерь, определяемых местными гидравлическими сопротивлениями r_2 , r_3 и r_4 в ветвях системы, ведущих от распределителя к камерам A , B и аккумулятору $Ак$ соответственно.

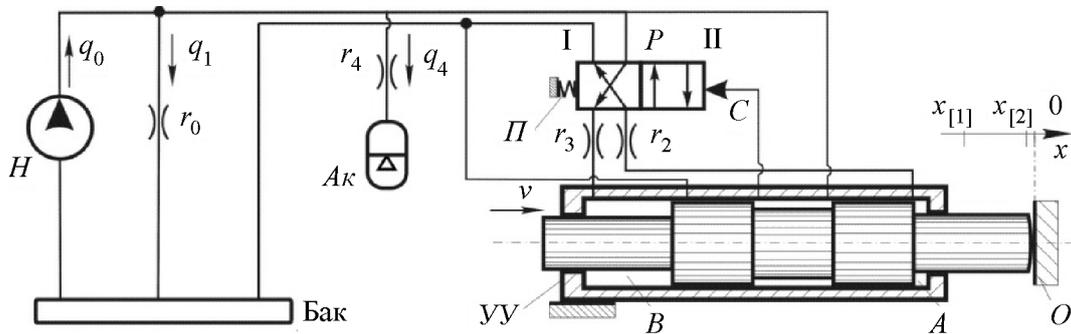


Рис. 1. Расчетная схема гидроударной системы с задержкой движения бойка: H — насос; $Ак$ — аккумулятор; P — распределитель; $УУ$ — ударный узел; O — ограничитель; Π — пружина; A, B — камеры обратного и прямого хода $УУ$ соответственно; C — управляющая линия распределителя P (при координате бойка $x < x_{[1]}$ C соединена со сливной линией, при $x > x_{[2]}$ — с напорной); стрелка указывает положительное направление потока жидкости или скорости бойка

Изменяется структура цикла: взаимодействие бойка и ограничителя частично упругое и характеризуется коэффициентом восстановления скорости R ; появляется 4-я фаза, в которой при давлении в системе выше давления задержки $p_{[3]}$ часть прямого хода бойка, от координаты $x_{[2]}$ * до точки взаимодействия с ограничителем, происходит при соединении камеры A с напорной линией, а камеры B — со сливной (распределитель P находится в позиции Π). При этом условия сопряжения решений дифференциальных уравнений в точках припасовки (3) [1] принимают вид

$$x \geq x_{[2]} \text{ и } p > p_{[3]} \text{ — I} \rightarrow \text{II}; \quad x \leq x_{[1]} \text{ — II} \rightarrow \text{I}; \quad x = 0, \quad v_+ = -Rv_-, \quad (1)$$

(v_- и v_+ — скорости бойка до и после взаимодействия с ограничителем), в правой части второго уравнения (1) [1] появляется слагаемое, характеризующее зависящую от давления в камерах ударного устройства силу трения в паре “корпус – боек”:

$$-S_f \cdot 0.5(p_{A(j)} + p_{B(j)}) \text{sign} v,$$

где $p_{A(j)}$ и $p_{B(j)}$ — давления в камерах A и B ударного узла:

$$p_{A(j)} = p + r_4 q_4^2 \text{sign} q_4 + r_2 (v S_A)^2 \text{sign} v, \quad p_{B(j)} = -r_3 (v S_B)^2 \text{sign} v \quad (j = 2, 4), \quad (2a)$$

$$p_{A(j)} = -r_2 (v S_A)^2 \text{sign} v, \quad p_{B(j)} = p + r_4 q_4^2 \text{sign} q_4 - r_3 (v S_B)^2 \text{sign} v \quad (j = 1, 3), \quad (2б)$$

а правая часть третьего уравнения (1) [1], представляющая собой расход жидкости q_4 , поступающей в аккумулятор, не выражается в явном виде. Для его вычисления используем законы Кирхгофа для гидравлических цепей

$$q_0 - S_{(j)} v - q_4 - q_1 = 0, \quad p + p_4 - p_1 = 0$$

и уравнения падения давления на сопротивлениях r_0 и r_4 :

$$p_1 = r_0 q_1, \quad p_4 = r_4 q_4^2 \text{sign} q_4,$$

*Параметр с подстрочным индексом в квадратных скобках — значение соответствующей характеристики в точке припасовки; подстрочный индекс в круглых скобках — номер фазы цикла.

где $S_{(j)} = 0$ — в 1-й фазе цикла; $S_{(j)} = -S_A$ — во 2-й и 4-й; $S_{(j)} = S_B$ — в 3-й, преобразуя координаты, получим квадратное уравнение относительно q_4 :

$$-\frac{r_4}{r_0} q_4^2 \operatorname{sign} q_4 - q_4 + q_0 - S_{(j)} v - \frac{P_4}{r_0} = 0.$$

После перехода к безразмерным переменным по формулам (4) [1] уравнения динамики системы и условия их сопряжения (1) примут вид:

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{v}, \quad \frac{d\bar{v}}{dt} = \sigma_1 [(-\sigma_0 \bar{p}_{A(j)} + \bar{p}_{B(j)}) / (1 + \sigma_0) - \bar{S}_f 0.5(\bar{p}_{A(j)} + \bar{p}_{B(j)}) \operatorname{sign}(\bar{v})], \quad \frac{d\bar{p}}{dt} = \bar{p}^{1+1/\gamma} \bar{q}_4, \quad (3)$$

$$\bar{x} \geq \bar{x}_{[2]} \quad \text{и} \quad \bar{p} > \bar{p}_{[3]} \quad \text{— I} \rightarrow \text{II}; \quad \bar{x} \leq \bar{x}_{[1]} \quad \text{— II} \rightarrow \text{I}; \quad \bar{x} = 0, \quad \bar{v}_+ = -R\bar{v}_-,$$

где

$$\bar{p}_{A(j)} = \bar{p}_4 + \bar{r}_4 \bar{q}_4^2 \operatorname{sign} \bar{q}_4 + \bar{r}_2 [\bar{v} \sigma_0 / (1 + \sigma_0)]^2 \operatorname{sign} \bar{v}; \quad \bar{p}_{B(j)} = -\bar{r}_3 [\bar{v} / (1 + \sigma_0)]^2 \operatorname{sign} \bar{v} \quad (j = 2, 4),$$

$$\bar{p}_{A(j)} = -\bar{r}_2 [\bar{v} \sigma_0 / (1 + \sigma_0)]^2 \operatorname{sign} \bar{v}, \quad \bar{p}_{B(j)} = \bar{p} + \bar{r}_4 \bar{q}_4^2 \operatorname{sign} \bar{q}_4 - \bar{r}_3 [\bar{v} / (1 + \sigma_0)]^2 \operatorname{sign} \bar{v} \quad (j = 1, 3),$$

($\bar{r}_k = r_k q_0 / r_0$) распад \bar{q}_4 в (3) определяется из уравнения

$$1 - \bar{S}_{(j)} \bar{v} - \bar{q}_4 - \bar{p} - \bar{r}_4 \bar{q}_4^2 \operatorname{sign} \bar{q}_4 = 0,$$

где $\bar{S}_{(j)} = 0$ ($j = 1$); $\bar{S}_{(j)} = -\sigma_0 / (1 + \sigma_0)$ ($j = 2, 4$); $\bar{S}_{(j)} = 1 / (1 + \sigma_0)$.

Таким образом, к четырем основным критериям подобия [1]: σ_0 — отношение площадей бойка со сторон камер прямого и обратного хода; σ_1 — комплексный параметр, пропорциональный отношению энергии аккумулятора к энергии движения бойка при заданных параметрах системы; $\bar{x}_{[1]}$ — длина фазы обратного хода бойка и $\bar{p}_{[3]}$ — давление задержки

добавляются дополнительные:

$$\bar{x}_{[2]} = \gamma S_* / ((1 - \eta)^{1/\gamma} V_n) x_{[2]} \quad \text{— длина фазы прямого хода, при которой камера A связана с напором, а камера B — со сливом};$$

$$R = v_+ / v_- \quad \text{— коэффициент восстановления скорости бойка};$$

$\bar{r}_2 = r_2 q_0 / r_0$, $\bar{r}_3 = r_3 q_0 / r_0$ и $\bar{r}_4 = r_4 q_0 / r_0$ — сопротивления в ветвях системы, ведущих от распределителя к камерам A, B и аккумулятору Ak соответственно;

$$\bar{S}_f = \bar{S}_f / S_+ \quad \text{— коэффициент, учитывающий трение в паре “корпус–бок”}.$$

С помощью указанных критериев учитываются свойства конкретной машины и влияние их на динамические (координату \bar{x} и скорость \bar{v} бойка, давление \bar{p} в аккумуляторе) и интегральные (предударную скорость \bar{v}_j^* и размах колебаний \bar{X}_{\max}^* бойка, время цикла \bar{T}_C^* , мощность \bar{N}^* и КПД η^* системы, среднее давления за цикл \bar{p}_m^* [1]) характеристики предельных циклов системы исследуется далее.

Как и на предыдущем этапе исследований [1], анализ влияния дополнительных критериев подобия на работу системы велся с использованием номограмм изолиний интегральных характеристик в сечениях $\sigma_0 \sigma_1 \bar{x}_{[1]} \bar{p}_{[3]}$, в которой среднее давление в системе находится в диапазоне $\bar{p}_m = 0.05 - 0.5$, называемой далее областью, ограниченной по давлению (ОД-областью).

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ФАЗЫ ПРЯМОГО ХОДА $\bar{x}_{[2]}$, ПРИ КОТОРОЙ КАМЕРА А СОЕДИНЕНА С НАПОРНОЙ ЛИНИЕЙ

Расчеты характеристик предельных циклов с учетом критерия $\bar{x}_{[2]}$ (рис. 2б) показали, что увеличение этого параметра до определенного предела ($\bar{x}_{[2]} = 0.3$) приводит к смещению *ОД*-области вверх по оси σ_1 (ср. с рис. 2а). В области цикла с задержкой характеристики системы не изменяются, в области цикла без задержки свои значения сохраняет лишь максимальный размах колебаний \bar{X}_{\max}^* , вместе с тем происходит увеличение предупредной скорости \bar{v}_I^* и мощности \bar{N}^* , снижается КПД системы η^* и уменьшается время цикла \bar{T}_C^* . Так, в точке $\sigma_0 = 0.4$, $\sigma_1 = 10^2$ (см. рис. 2а, б) \bar{v}_I^* и \bar{N}^* при изменении $\bar{x}_{[2]}$ от 0 до 0.3 увеличиваются соответственно на 3 и 24 %, а η^* и \bar{T}_C^* — снижаются соответственно на 13 и 19 %.

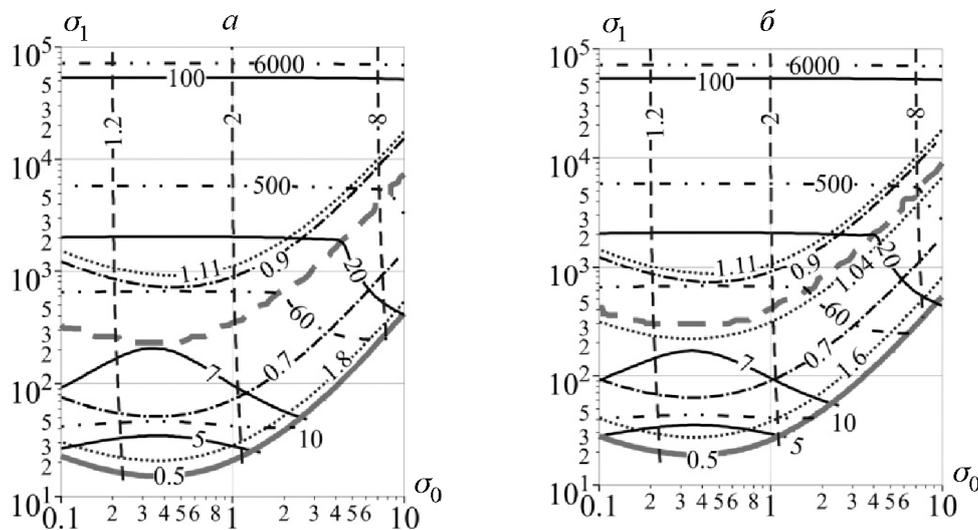


Рис. 2. Номограммы изолиний выходных характеристик в сечениях пространства $\sigma_0 \sigma_1 \bar{x}_{[2]} \bar{p}_{[3]}$ плоскостями $\bar{x}_1 = 1$, $\bar{p}_3 = 0.1$, $\bar{x}_{[2]} = 0$ (а), 0.3 (б). Здесь и на остальных рисунках приняты следующие обозначения: — — скорость \bar{v}_I^* ; --- — КПД η^* ; $\text{-}\cdot\text{-}\cdot\text{-}$ — мощность \bar{N}^* ; \cdots — время цикла \bar{T}_C^* ; --- — размах колебаний \bar{X}_{\max}^* ; — — среднее давление в системе за цикл \bar{p}_m^* ; — — линия, разделяющая области цикла с задержкой (внизу) и без задержки (вверху)

Независимость характеристик системы с задержкой от критерия $\bar{x}_{[2]}$ связана с невозможностью переключения распределительного устройства из позиции I в позицию II при давлении в системе $\bar{p} < \bar{p}_{[3]}$ — условию появления в рабочем цикле системы фазы задержки. Поэтому на протяжении всего прямого хода бойка сохраняется распределение жидкости, при котором камера B соединена с напорной линией, а камера A — со сливной, 4-я фаза исключается из структуры цикла.

Повышение при учете $\bar{x}_{[2]}$ динамических свойств (рост \bar{v}_I^* и \bar{N}^* , уменьшение \bar{T}_C^*) системы без задержки связано с уменьшением потребления устройством жидкости за цикл и, как следствие, повышением давления в системе в течение предельного цикла. Так, для указанной точки плоскости $\sigma_0 \sigma_1$ изменение $\bar{x}_{[2]}$ от 0 до 0.3 ведет к повышению среднего давления \bar{p}_m от 0.2 до 0.37, т. е. на 35 %.

При изменении основных критериев подбора, в случае равенства нулю длины фазы прямого хода, при которой камера A соединена с напорной линией ($\bar{x}_{[2]} = 0$), происходит плавное изменение выходных характеристик во всей $ОД$ -области. В случае, когда $\bar{x}_{[2]}$ отлично от нуля, характеристики предельных циклов плавно изменяются в области цикла с задержкой и без задержки, тогда как при переходе через границу этих областей они в достаточно узкой области претерпевают скачкообразные изменения (рис. 3). На рис. 3б показано увеличение времени цикла \bar{T}_C^* на $\sim 30\%$ и предупредительной скорости бойка \bar{v}_I^* на $\sim 15\%$. Первое обусловлено увеличением на $\bar{x}_{[2]}$ длины прямого хода бойка, при котором камера B соединена с напорной линией, вследствие чего происходит увеличение расхода, потребляемого устройством за цикл, второе — тем, что давление на боек со стороны камеры B действует в течение всего его хода до координаты $\bar{x} = 0$.

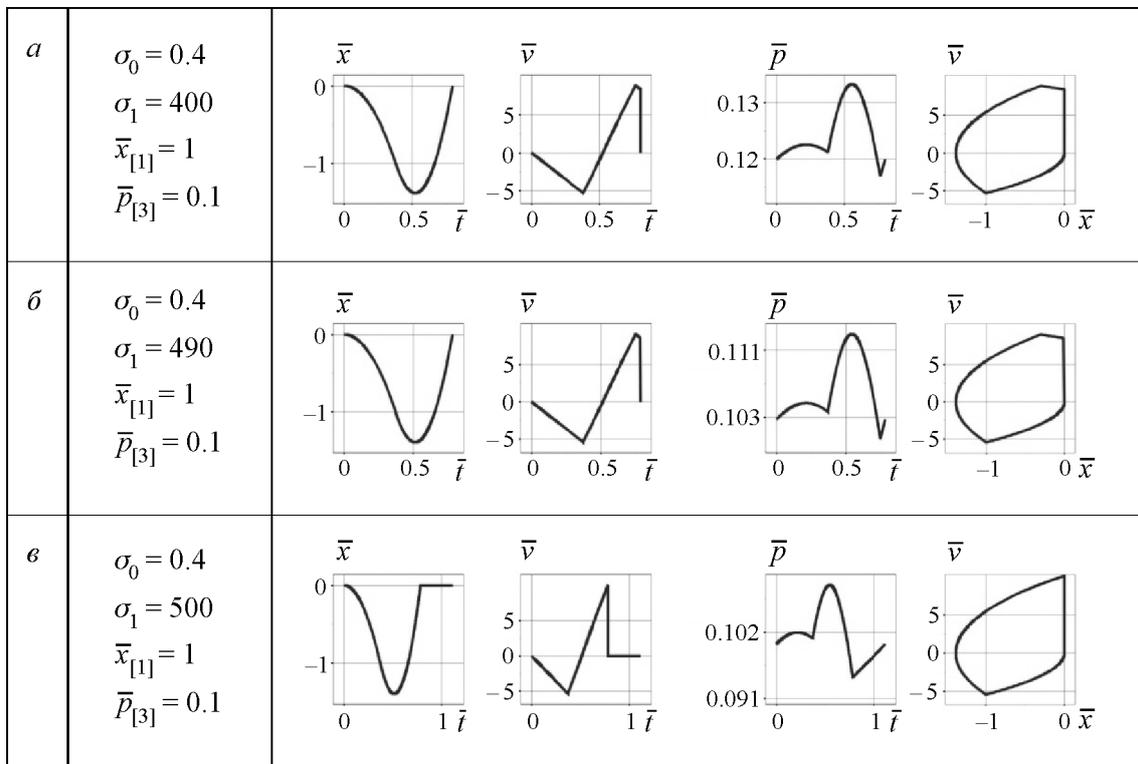


Рис. 3. Теоретические осциллограммы динамических характеристик (координаты \bar{x} , скорости \bar{v} , давления \bar{p}) и фазовая кривая ($\bar{v} - \bar{x}$ -зависимость) предельных циклов системы при $\bar{x}_{[2]} = 0.3$

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о предпочтительности системы с задержкой движения бойка по сравнению с системой без задержки, поскольку в первой обеспечивается независимость характеристик от критерия $\bar{x}_{[2]}$ — длины фазы прямого хода, при которой управляющая линия C соединена с напорной линией и в случае превышения давлением в системе величины $\bar{p}_{[3]}$ камера A также соединяется с напорной линией, а камера B — со сливной. В системе с задержкой из-за падения давления в системе в конце прямого хода ниже величины $\bar{p}_{[3]}$ соединение камеры A с напорной линией не происходит. Это позволяет обеспечить стабильность проектируемых характеристик такой системы и повысить надежность ра-

боты распределительного устройства. Однако при проектировании распределителей для системы с задержкой необходимо принимать во внимание, что увеличение $\bar{x}_{[2]}$ ведет к смещению границы, разделяющей области циклов без задержки и с задержкой, причем в сторону области циклов с задержкой, поэтому подбирать их параметры следует таким образом, чтобы не оказаться на этой границе.

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОРОСТИ БОЙКА R ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕМ

На рис. 4 представлена номограмма изолиний при коэффициенте восстановления скорости бойка $R = 0.1$, сравнение которой с номограммой, полученной для того же сечения $\sigma_0\sigma_1$ при $R = 0$ (рис. 2а) показывает, что ограниченная по давлению область при учете коэффициента R смещается вниз по оси σ_1 (σ_1 — критерий, пропорциональный отношению энергии аккумулятора к энергии движения бойка при заданных параметрах системы). Это обусловлено тем, что в системе без задержки движения бойка его скорость в начале 2-й фазы цикла отлична от нуля, что приводит к увеличению расхода жидкости, потребляемой устройством за цикл и, как следствие, к падению давления в системе. Особенность поведения системы при $R \neq 0$ также заключается в том, что в пространстве критериев подобия появляется область (на рис. 4 полоса, ограниченная полужирными штриховыми линиями), в которой не реализуется одноударный предельный цикл.

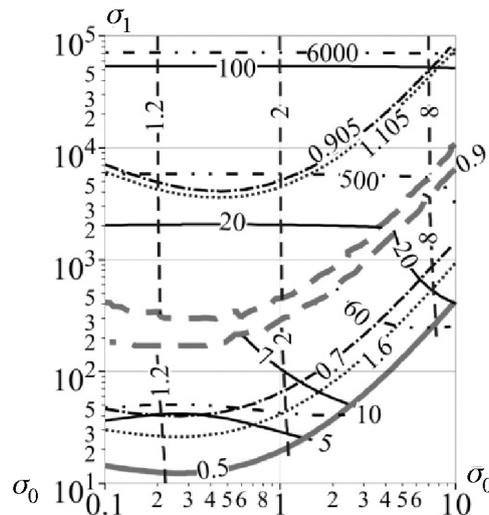


Рис. 4. Номограммы изолиний выходных характеристик в сечениях пространства $\sigma_0\sigma_1\bar{x}_1\bar{p}_{[3]}$ плоскостями $\bar{x}_1 = 1$, $\bar{p}_{[3]} = 0.1$ при $R = 0.1$

В области цикла с задержкой характеристики системы практически не зависят от критерия R (ср. рис. 2а и 4), а в области цикла без задержки при его учете происходит уменьшение времени цикла \bar{T}_C^* , снижение предупредительной скорости \bar{v}_I^* и мощности \bar{N}^* , несколько увеличиваются максимальный размах колебаний \bar{X}_{\max}^* и КПД системы η^* . Так, в точке $\sigma_0 = 0.4$, $\sigma_1 = 10^2$ при значениях $R = 0.1, 0.2, 0.3$ (по сравнению с $R = 0$) \bar{T}_C^* уменьшается на 2.6, 4.2 и 5.2%, \bar{v}_I^* — соответственно на 4.9, 7.4 и 7.4%, \bar{N}^* — на 7.5, 10.6 и 9.3%, а \bar{X}_{\max}^* и η^* увеличиваются соответственно на 1.4, 4.2, 9.3% и 3.5, 8.1, 13.8%.

Осциллограммы, построенные для нескольких точек сечения пространства основных критериев подобия (см. рис. 4), демонстрируют изменения, происходящие при переходе от области цикла без задержки (рис. 5а) к области цикла с задержкой (рис. 5в). В диапазоне $200 < \sigma_1 < 300$ наблюдается многоударный цикл. В приведенном на рис. 5б случае он состоит из трех ударов с незначительно меняющимися предупредной скоростью \bar{v}_I^* и размахом колебаний \bar{X}_{\max}^* бойка (менее чем на 1 %) и изменением времени цикла \bar{T}_C^* на ~6 %. После двух циклов с задержкой давление в системе в конце 3-й фазы повышается до величины, большей $\bar{p}_{[3]}$, что оказывается достаточным для реализации третьего цикла без задержки, после которого давление падает ниже величины $\bar{p}_{[3]}$, затем все повторяется.

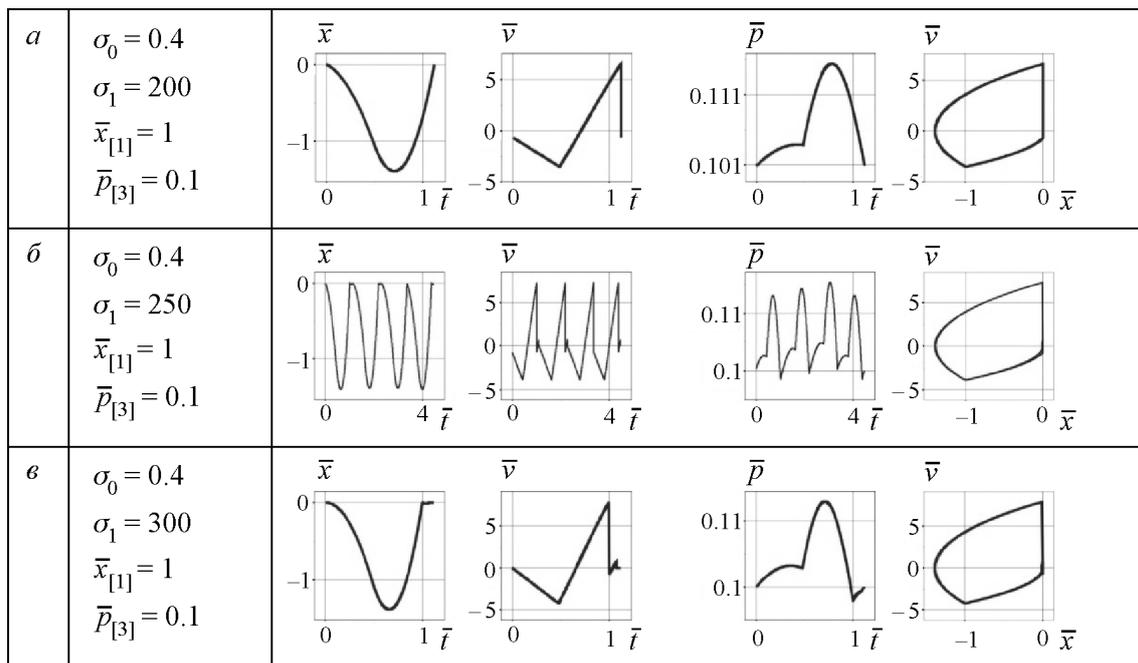


Рис. 5. Теоретические осциллограммы и фазовая кривая предельных циклов системы при $R = 0.1$

Таким образом, влияние коэффициента восстановления скорости бойка на характеристики гидроударной системы двухстороннего действия без задержки сводится к снижению ее динамических свойств (уменьшению предупредной скорости \bar{v}_I^* и мощности \bar{N}^*), тогда как в системе с задержкой характеристики остаются неизменными. Это свидетельствует о предпочтительности второго типа систем. Вместе с тем появление при $R \neq 0$ зоны, в которой наблюдается многоударный цикл, требует более взвешенного подхода к выбору параметров гидроударной системы, чтобы исключить попадание в нее при изменении условий взаимодействия с горным массивом.

ВЛИЯНИЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ В ПАРЕ “КОРПУС – БОЕК”

Полученные при расчетах предельных циклов с учетом трения скольжения в паре “корпус – боек” номограммы (рис. 6) показывают, что в этом случае по сравнению с системой без трения (рис. 2а) происходит смещение *ОД*-области вправо и вверх, снижаются предупредная скорость \bar{v}_I^* , мощности \bar{N}^* и КПД η^* , происходит сжатие и смещение вправо по оси σ_0 \bar{X}_{\max}^* -изолиний, т. е. уменьшается размах колебаний. К примеру, для точек плоскости $\sigma_0 = 0.4$,

$\sigma_1 = 10^2$ и 10^3 (см. рис. 2а и рис. 4) при изменении \bar{S}_f от 0 до 0.5 \bar{v}_l^* уменьшается соответственно на 10 и 25 %, \bar{N}^* — на 30 и 45 %, η^* — на 53 и 46 %, \bar{X}_{\max}^* — на 22 и 22.3 %. Меньше всего при этом изменяется время цикла \bar{T}_C^* , оно увеличивается на 11.9 и 0.2 %.

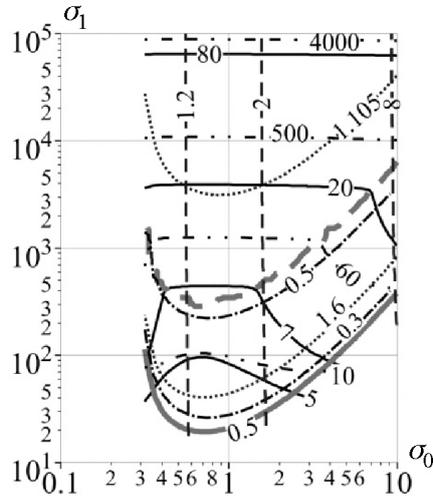


Рис. 6. Номограммы изолиний выходных характеристик в сечениях пространства $\sigma_0 \sigma_1 \bar{x}_1 \bar{p}_{[3]}$ плоскостями $\bar{x}_1 = 1, \bar{p}_3 = 0.1$ при $\bar{S}_f = 0.5$

Теоретические осциллограммы (рис. 7), построенные для одной из точек представленного на рис. 2а и рис. 6 сечения $\sigma_0 \sigma_1$, показывают, что рост \bar{S}_f от 0 до 0.5 приводит к снижению предупредной скорости бояка \bar{v}_l^* на 13 % (рис. 7в) и увеличению времени цикла на 5 % (рис. 7б). Повышается среднее давление в системе от 0.104 (рис. 7а, б) до 0.145 (рис. 7в), в результате происходит переход от режима работы системы с задержкой к режиму без задержки.

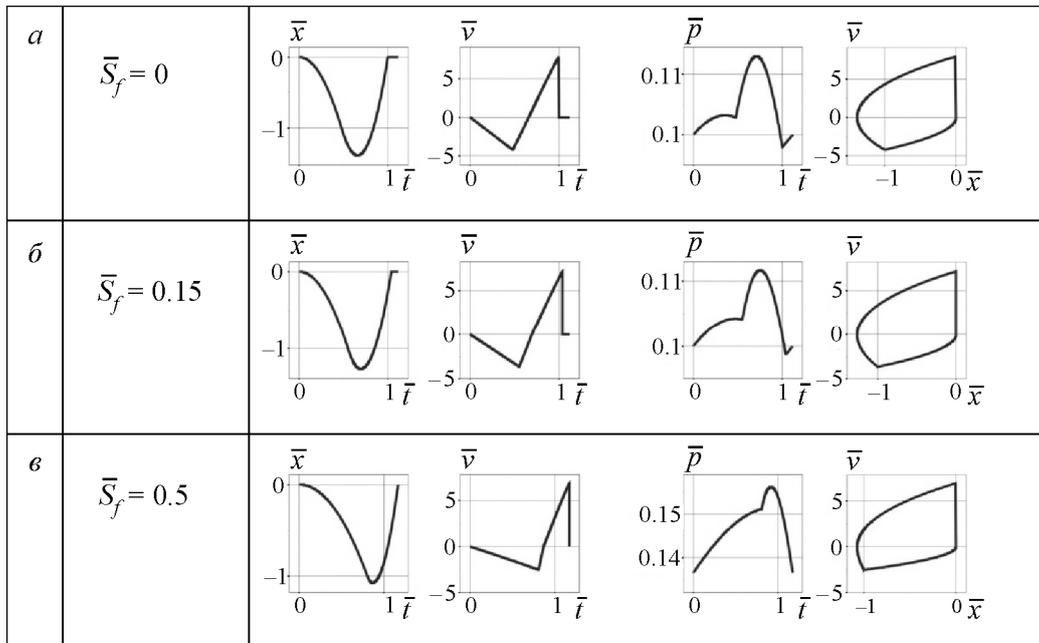


Рис. 7. Теоретические осциллограммы и фазовая кривая предельных циклов системы при $x_{[1]} = 1, \bar{p}_{[3]} = 0.1, \sigma_0 = 0.4, \sigma_1 = 300$

ВЛИЯНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ВЕТВЯХ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Количество параметров, при помощи которых в модели учитываются местные гидравлические сопротивления, равно трем: $\bar{r}_2, \bar{r}_3, \bar{r}_4$ (2), а если принимать во внимание направления потоков жидкости в ветвях, — шести:

$$\bar{r}_{2+}, \bar{r}_{3+}, \bar{r}_{4+} \text{ и } \bar{r}_{2-}, \bar{r}_{3-}, \bar{r}_{4-} \quad (4)$$

(знак “+” означает положительное направление потока в соответствующей ветви, которое указано на рис. 1 стрелками; “-” — отрицательное). Исследовать и представить влияние их изменения на поведение выходных характеристик во всем пространстве основных критериев подобия не представляется возможным, кроме того, сопротивления \bar{r}_2 и \bar{r}_3 зависят от отношения площадей бойка σ_0 со сторон камер A и B ударного узла.

Поэтому при расчетах сопротивления (4) выражали через четыре параметра: сопротивление в ветви, ведущей к аккумулятору r_{4+} , отношение площади сечений каналов устройства S_P (ее принимали везде одинаковой) к площади сечения газожидкостного аккумулятора $S_{Ак}$ ($\bar{S}_{PАк} = S_P / S_{Ак}$) и к площади $S_* = S_A + S_B$ ($\bar{S}_{P*} = S_P / S_*$), а также один из основных критериев подобия — отношение площадей бойка со сторон камер A и B ударного узла σ_0 .

Для этого использовали формулы, описывающие падения давления в местных гидравлических сопротивлениях типа расширение и сужение [2] соответственно:

$$p_E = r_E q^2 \operatorname{sign} q \quad \text{и} \quad p_W = r_W q^2 \operatorname{sign} q,$$

$$\text{где } r_E(S_1, S_2) = 0.5 \rho \zeta_E(S_2 / S_1) / S_2^2; \quad r_W(S_1, S_2) = 0.5 \rho \zeta_W(S_2 / S_1) / S_2^2; \quad (5)$$

q — расход, проходящий через сопротивление; ρ — плотность; S_1 и S_2 — площади сечений до и после расширения или сужения соответственно; $\zeta_E(S_2 / S_1) = (S_2 / S_1 - 1)^2$; $\zeta_W(S_2 / S_1) = (1 / (0.57 + 0.043 / (1.1 - S_2 / S_1)) - 1)^2$.

Используя (5), сопротивления (4) можно представить в следующем виде:

- в ветви 2

$$\text{при } S_P < S_A: \quad r_{2-} = 0.5 \rho \zeta_E(S_A / S_P) / S_A^2, \quad r_{2+} = 0.5 \rho \zeta_W(S_P / S_A) / S_P^2,$$

$$\text{при } S_P > S_A: \quad r_{2-} = 0.5 \rho \zeta_W(S_A / S_P) / S_A^2, \quad r_{2+} = 0.5 \rho \zeta_E(S_P / S_A) / S_P^2;$$

- в ветви 3

$$\text{при } S_P < S_B: \quad r_{3-} = 0.5 \rho \zeta_W(S_P / S_B) / S_P^2, \quad r_{3+} = 0.5 \rho \zeta_E(S_B / S_P) / S_B^2,$$

$$\text{при } S_P > S_B: \quad r_{3-} = 0.5 \rho \zeta_E(S_P / S_B) / S_P^2, \quad r_{3+} = 0.5 \rho \zeta_W(S_B / S_P) / S_B^2;$$

- в ветви 4 (считаем $S_P < S_{Ак}$)

$$r_{4+} = 0.5 \rho \zeta_E(S_{Ак} / S_P) / S_P^2, \quad r_{4-} = 0.5 \rho \zeta_W(S_P / S_{Ак}) / S_P^2.$$

Далее, разделим каждое из полученных выражений на $r_{4+} = 0.5 \rho \zeta_W(S_{Ак} / S_P) / S_P^2$. В результате для сопротивлений (4) получим формулы, выражающие их через параметры

$$\bar{r}_{4+}, \bar{S}_{PАк}, \bar{S}_{P*} \text{ и } \sigma_0. \quad (6)$$

Применение этих формул в расчетах позволило исследовать изменение характеристик предельных циклов при заданных геометрических параметрах устройства, описываемых критериями (6), в пространстве основных критериев подобия $\sigma_0\sigma_1\bar{x}_1\bar{p}_{[3]}$. Расчеты и представление данных в виде номограмм в сечениях $\sigma_0\sigma_1$ показали, что происходит снижение КПД η^* , в области цикла с задержкой (при больших значениях критерия σ_1) изменяется вид практически всех изолиний выходных характеристик, уменьшаются предупредная скорость \bar{v}_l^* и мощность \bar{N}^* системы, размах колебаний \bar{X}_{\max}^* . Для примера на рис. 8 представлены номограммы характеристик в сечении $\sigma_0\sigma_1$, подобном приведенному на рис. 2а, для случая фиксированных значений r_{4+} и \bar{S}_{PAK} и изменении относительной площади каналов устройства \bar{S}_{P*} .

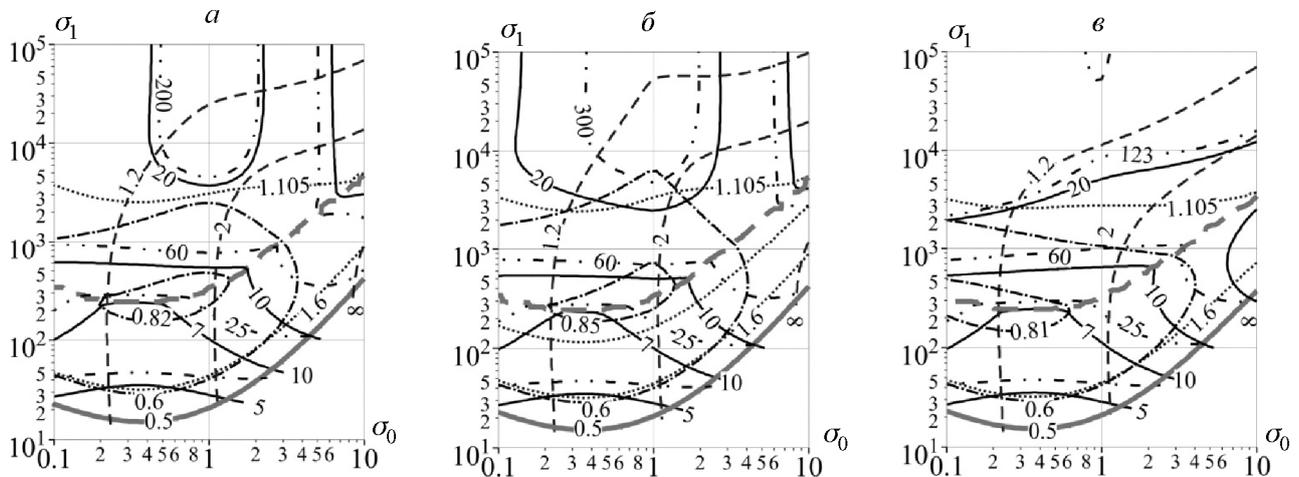


Рис. 8. Номограммы изолиний выходных характеристик в сечениях пространства $\sigma_0\sigma_1\bar{x}_1\bar{p}_{[3]}$ плоскостями $\bar{x}_1 = 1$, $\bar{p}_3 = 0.1$ при $r_{4+} = 4 \cdot 10^{-4}$ (а–в), $\bar{S}_{PAK} = 0.1$, $\bar{S}_{P*} = 0.2, 0.5, 1$ (а–в)

Оказалось, что в этом случае КПД η^* наиболее существенно (на $\sim 30\%$ и более) снижается при значениях критерия $\sigma_1 > 10^3$, причем в плоскостях номограмм появляются локальные максимумы η^* в диапазоне критериев $\sigma_0 = 0.3 - 0.8$, $\sigma_1 = 250 - 300$. Кроме того, при возрастании \bar{S}_{P*} от 0.1 до 1 максимум КПД достигается при $\bar{S}_{P*} = 0.5$.

Полученные результаты могут служить основанием к выбору площади сечений каналов гидроударных устройств, также они показывают, что увеличение критерия σ_1 , характеризующего отношение энергий аккумулятора и бойка при заданных параметрах источника расхода, повышает эффективность реальных систем лишь до определенного предела.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования демонстрируют существенность влияния дополнительных параметров на количественные характеристики рабочих циклов и их структуру. Так, при учете в модели коэффициента восстановления скорости бойка R в ограниченной по давлению области наблюдается подобласть многоударного цикла, в которой динамическая картина явления повторяется после нескольких взаимодействий бойка с ограничителем.

Наши результаты не согласуются с ранее полученными в [3, 4] по влиянию критериев \bar{x}_2 и R на характеристики гидроударных систем без задержки. Так, в [3] рост критерия \bar{x}_2 практически не влияет на время цикла и размах колебаний и приводит к снижению энергии удара и мощности системы, а увеличение коэффициента восстановления R (в диапазоне 0–0.5) выражается в росте размаха колебаний и слабом изменении мощности и времени цикла. Это связано с особенностью использованной в [3, 4] и других работах расчетной схемы, которая чрезмерно упрощает исследуемый процесс и приводит к противоречивым результатам. В настоящей работе показано, что в системах без задержки движения бойка увеличение до определенного предела критерия $\bar{x}_{[2]}$ приводит к росту динамических свойств системы (предударной скорости бойка \bar{v}_j^* и мощности системы \bar{N}^*), а увеличение критерия R — к их снижению. Это позволяет более обоснованно подходить к выбору параметров гидроударных систем двухстороннего действия.

Таким образом, результаты исследований позволяют оценить влияние каждого из выбранных дополнительных параметров на характеристики рассматриваемых систем. С их использованием возможно уточнение основных параметров, выбранных, например, при помощи методики [5] и таблиц безразмерных характеристик систем, рассчитанных для точек пространства основных критериев подобия [1]. Однако в реальных машинах влияние конструктивных особенностей проявляется в совокупности и, в силу нелинейности самой системы, вряд ли может быть оценено просто механическим суммированием. При окончательном выборе параметров гидроударной системы следует проводить расчеты с одновременным учетом исследовавшихся в данной работе и других дополнительных параметров, которые могут оказывать существенное воздействие на ее характеристики.

ВЫВОДЫ

1. В пространстве основных критериев подобия проведено исследование влияния параметров, отражающих конструктивные особенности ударного устройства и условия его взаимодействия с горным массивом, на динамику и выходные характеристики объемных гидроударных систем двухстороннего действия с задержкой и без задержки движения бойка.

2. Установлено, что длина фазы прямого хода бойка $\bar{x}_{[2]}$, на протяжении которой камера A связана с напором, а камера B — со сливом, и коэффициент восстановления скорости бойка R в области цикла с задержкой практически не влияют на характеристики системы; в области цикла без задержки первая приводит к повышению динамических свойств системы (предударной скорости \bar{v}_j^* и мощности \bar{N}^*), второй, напротив, к их снижению. При коэффициенте восстановления скорости бойка R , отличном от нуля, области циклов без задержки и с задержкой отделяются зоной, в которой реализуется многоударный цикл.

3. Влияние сухого трения в паре “корпус–боек” выражается главным образом в снижении КПД η^* и мощности \bar{N}^* системы; влияние местных гидравлических сопротивлений также снижает КПД и ведет к появлению его локальных оптимумов в плоскостях $\sigma_0\sigma_1$ пространства основных критериев подобия.

4. Полученные результаты могут быть полезными при внесении корректив в параметры ударной системы. Однако в реальном устройстве их совместное действие предсказать сложно. При проектировании гидроударных устройств сначала следует провести выбор параметров в пространстве основных критериев подобия, а затем в выбранной области основных критериев подобия осуществить поиск оптимального решения с учетом конструктивных особенностей устройств и условий их взаимодействия с горным массивом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Городилов Л. В.** Исследование динамики гидроударных объемных систем двухстороннего действия. Ч. II // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
2. **Альтшуль А. Д., Киселев П. Г.** Гидравлика и аэродинамика. — М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1965.
3. **Алимов А. Д., Басов С. А.** Гидравлические виброударные системы. — М.: Наука, 1990.
4. **Сагинов А. С., Янцен И. А., Ешуткин Д. Н., Пивень Г. Г.** Теоретические основы создания гидроимпульсных систем ударных органов машин. — Алма-Ата: Наука, 1985.
5. **Городилов Л. В., Пашина О. А.** Расчет параметров автоколебательных гидроударных систем с применением критериев подобия // *Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностр. ученых (28 июня-2 июля 2011 г.). Т. 3.* — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.

Поступила в редакцию 19/II 2013