

УПРУГО-ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ГИДРОСИСТЕМ, СОДЕРЖАЩЕЙ НЕРАСТВОРЕННЫЙ ВОЗДУХ

И. А. НЕМИРОВСКИЙ, О. И. ВАСЕНКОВ

(Представлена научно-техническим семинаром кафедры горных машин
и рудничного транспорта)

В рабочей жидкости объемных гидроприводов, как правило, имеется какое-то количество нерастворенного воздуха [1, 2]. Наличие газовой примеси существенно влияет на объемный модуль упругости рабочей жидкости, что сказывается на динамических характеристиках гидропривода.

Формулы для аналитического расчета суммарного объемного модуля упругости E_{Σ} газожидкостной смеси постепенно уточнялись (например, [5], [6] и др.). Наиболее приемлемая формула приведена в работе [6], но она пригодна для случая неизменного соотношения $\frac{W_{в_0}}{W_{ж_0}}$ (где $W_{в_0}$ — объем воздушной фазы при начальном давлении p_0 , а $W_{ж_0}$ — объем жидкой фазы при p_0) и изотермического процесса в газовых включениях.

Ниже излагаются результаты аналитического и экспериментального исследования упругих характеристик газожидкостной смеси, выполненного авторами в лаборатории гидроавтоматики Томского политехнического института. Полученные зависимости позволяют учитывать политропический процесс деформации газовых включений и переменное соотношение $\frac{W_{в_0}}{W_{ж_0}}$.

Рассмотрим две схемы работы газожидкостной смеси в гидросистеме.

Первая схема (рис. 1, а) соответствует работе газожидкостной смеси в замкнутой жесткой полости, когда первоначальное соотношение $\frac{W_{в_0}}{W_{ж_0}}$ остается неизменным (рассматриваются процессы, в течение которых растворения воздуха в жидкости и выделения воздуха из раствора практически не происходит).

Согласно второй схеме (рис. 1, б) деформация газожидкостной смеси происходит за счет изменения $\Delta W_{ж}$ первоначального объема жидкости $W_{ж_0}$, причем $\Delta W_{ж} = Q_1 - Q_2) \Delta t$.

Модуль объемной упругости (и газожидкостной смеси E_{Σ_i} при давлении p_i равен

$$E_{\Sigma_i} = \frac{\Delta p W_{\Sigma_i}}{\Delta W_{\Sigma_i}} = \frac{\Delta p (W_{ж_i} + W_{в_i})}{\Delta W_{в_i} + \Delta W_{ж_i}}, \quad (1)$$

где $\Delta W_{вi}$ и $\Delta W_{жi}$ — приращения объемов воздушной и газовой фаз, соответствующие приращению давления Δp . Определим значения ве-

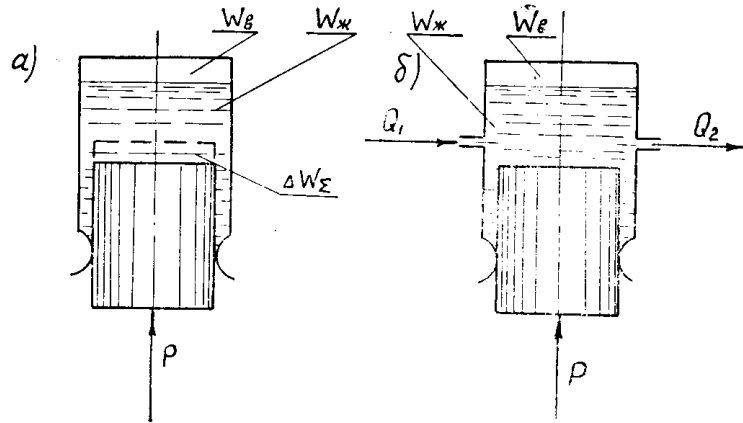


Рис. 1. Схема деформации газожидкостной смеси в гидросистеме: а) $\frac{W_{в0}}{W_{ж0}} = \text{const}$ — изменение суммарного объема $W_{с}$ за счет изменения объема полости; б) $\frac{W_{в0}}{W_{ж0}} = \text{var}$ — изменение соотношения $\frac{W_{в0}}{W_{ж0}}$ за счет изменения объема $W_{ж0}$ при постоянном объеме полости

личин, входящих в формулу (1), для двух схем работы гидрожидкостной смеси.

Первая схема (рис. 1, а)

Пусть при давлении p_i в объеме $W_{сi}$ полости гидросистемы содержится объем $W_{жi}$ жидкости и объем $W_{вi}$ воздуха, то есть $W_{сi} = W_{жi} + W_{вi}$. Тогда приращение объема воздуха $\Delta W_{в} = W_{вi} - W_{вi+1}$, вызванное изменением давления $\Delta p = p_{i+1} - p_i$, можно определить из соотношения $p_i W_i^n = p_{i+1} \cdot W_{вi+1}^n = (p_i + \Delta p) (W_{сi} - \Delta W_{в})$, где n — показатель политропы.

После элементарных преобразований получаем

$$\Delta W_{в} = \frac{\Delta p \cdot W_{вi}}{n (p_i + \Delta p)}. \quad (2)$$

Приращение объема жидкости равно

$$\Delta W_{ж} = \frac{\Delta p \cdot W_{жi}}{E_{ж}}, \quad (3)$$

где $E_{ж}$ — объемный модуль упругости жидкости, который в данной работе принимается не зависящим от давления.

При политропическом процессе объем газовой фазы равен

$$W_{вi} = W_{в0} \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{1/n}. \quad (4)$$

В свою очередь

$$W_{жi} = W_{ж0} \left[1 - \frac{p_i - p_0}{E_{ж}} \right], \quad (5)$$

из уравнений (1), (2), (3), (4) и (5) получаем

$$E_{\Sigma a_i} = \frac{1 - \frac{p_i - p_0}{E_{ж}} + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{1/n}}{\frac{1}{E_{ж}} - \frac{p_i - p_0}{E_{ж}^2} + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} \cdot \frac{p_0^{1/n}}{np_i^{1/n} (p_i + \Delta p)}} \quad (6)$$

Формула (6) пригодна для определения как секанс-модуля, так и тангенс-модуля объемной упругости газожидкостной смеси. Для расчетов динамических процессов в гидроприводах используется тангенс-модуль. Тогда, согласно определению тангенс-модуля [4], имеем

$$\lim_{\Delta p \rightarrow 0} E_{\Sigma a_i} = \frac{1 - \frac{p_i - p_0}{E_{ж}} + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{1/n}}{\frac{1}{E_{ж}} - \frac{p_i - p_0}{E_{ж}^2} + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} \cdot \frac{p_0^{1/n}}{np_i^{1/n+1}}} \quad (7)$$

Следует отметить, что если принять $\frac{p_i - p_0}{E_{ж}} \rightleftharpoons 0$ и $n \approx 1$, то из выражения (7) получается формула, приведенная в [6].

Вторая схема (рис. 1, б)

Модуль объемной упругости газожидкостной смеси, как и в первом случае, может быть определен из выражения (1), в котором $W_{\Sigma i} = W_{B_0} + W_{ж_0} = \text{const}$; W_{B_i} подсчитывается по выражению (4). Что же касается текущего значения объема жидкой фазы $W_{ж_i}$, то при неизменном объеме полости W_{Σ} (рис. 1, б) величина $W_{ж_i}$ может быть определена как

$$W_{ж_i} = W_{ж_0} + (W_{B_0} - W_{B_i}) = W_{ж_0} + W_{B_0} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{1/n} \right] \quad (5a)$$

Из уравнений (1), (2), (3), (4) и (5a) получаем, считая $\Delta p \rightarrow 0$

$$E_{\Sigma b_i} = \frac{1 + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}}}{\frac{1}{E_{ж}} + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} \cdot \frac{1}{E_{ж}} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_i} \right)^{1/n} \right] + \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} \frac{p_0^{1/n}}{np_i^{1/n+1}}} \quad (8)$$

На рис. 2а, 2б приведены зависимости от давления объемных модулей упругости газожидкостной смеси $E_{\Sigma a}$ (первая схема по рис. 1, а) и $E_{\Sigma b}$ (вторая схема по рис. 1, б). Как видно из графика на рис. 2, с увеличением соотношения $\frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}}$ разница в $E_{\Sigma a}$ и $E_{\Sigma b}$ увеличивается. Существенно и влияние показателя политропы n на величину E_{Σ} .

Авторами выполнена экспериментальная проверка формул (7) и (8). При этом в отличие от эксперимента, описанного в [6], исследовалась гидрожидкостная смесь, в которой воздух не распределялся по всему объему жидкости в виде макропузырьков, а был сосредоточен в одном месте. Такое расположение воздушного включения соответствует реальным случаям сосредоточения воздуха в тупиковых магистралях, полостях, выемках гидросистем.

Кроме того, в этом случае можно учесть фактическое количество воздуха, так как процессы растворения и выделения воздуха протекают достаточно медленно. В случае же распределения пузырьков воздуха по всему объему жидкости [6] поверхность контакта воздуха с жид-

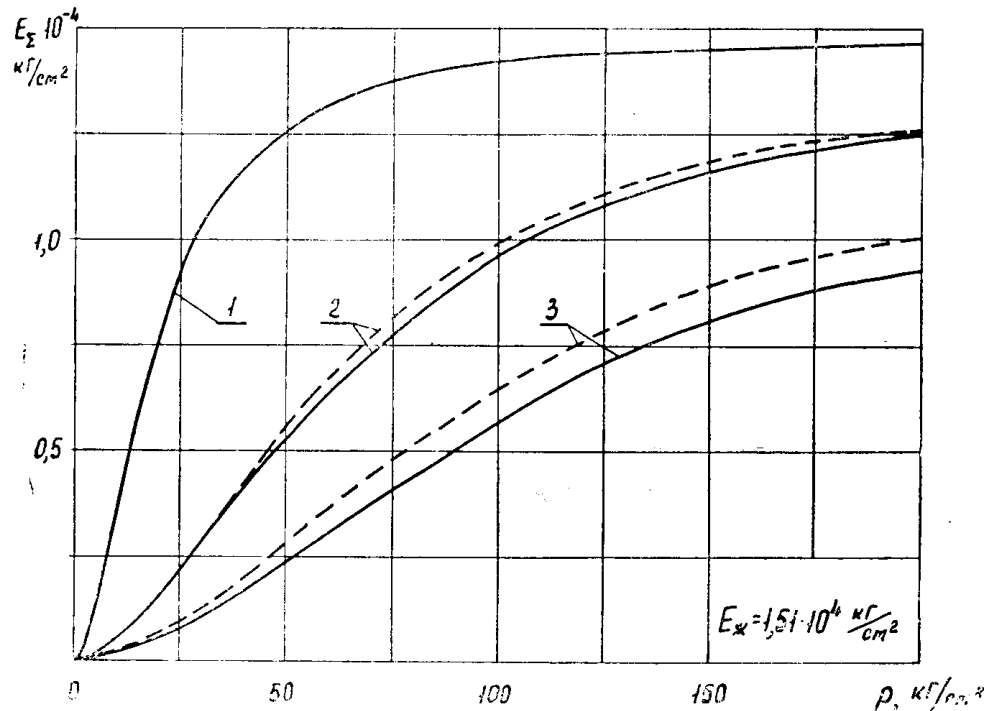


Рис. 2а. Зависимость модуля объемной упругости газожидкостной смеси $E_{\Sigma}(p)$ от давления p при $n = 1$:

$$1 - \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} = 0,01; \quad 2 - \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} = 0,10; \quad 3 - \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} = 0,30.$$

Сплошные линии (схема деформации а) рис. 1. Пунктирные линии (схема деформации б) рис. 1

костью велика, и в течение одного цикла переходного процесса может произойти существенное изменение соотношения $\frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}}$. Наличие массо-

обмена в процессе одного цикла сжатия газожидкостной смеси привело авторов работы [6] к выводу, что при быстром сжатии $n < 1$.

При экспериментальной проверке формул (7) и (8) осуществлялись обе схемы деформации рабочей жидкости, приведенные на рис. 1 (а и б). Предварительно исследовалась скорость растворения воздуха в рабочей жидкости. На рис. 3 приведены зависимости от времени количества воздуха в полости экспериментальной установки при определенном давлении и температуре и при различных динамических условиях. Эксперименты по проверке формул (7) и (8), а также по определению показателя n проводились после предварительного насыщения жидкости воздухом, то есть на таком участке кривых (рис. 3), где в течение одного цикла периодического процесса деформации смеси массообмена между газом и жидкостью практически не происходило.

В результате выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Модуль объемной упругости газожидкостной смеси зависит от схемы деформации. В частности, для схемы на рис. 1, а расчет $E_{\Sigma a_i}$

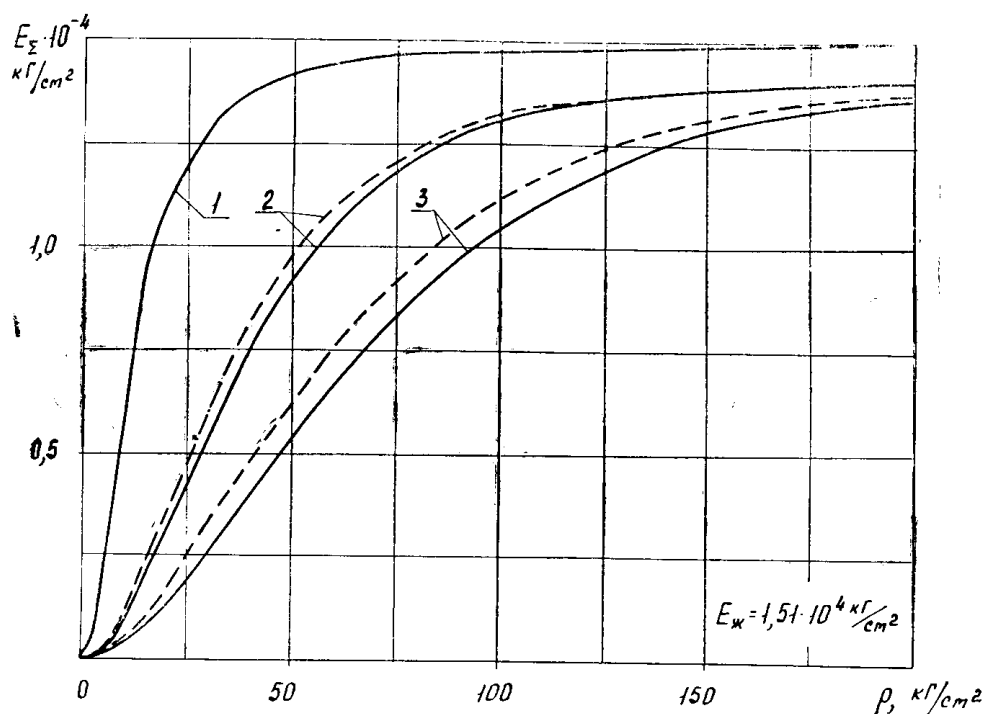


Рис. 26. Зависимость модуля объемной упругости газожидкостной смеси E_v от давления p при $n=1,4$:

$$1 - \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} = 0,01; \quad 2 - \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} = 0,10; \quad 3 - \frac{W_{B_0}}{W_{ж_0}} = 0,30.$$

Сплошные линии (схема деформации *а*) рис. 1. Пунктирные линии (схема деформации *б*) рис. 1,

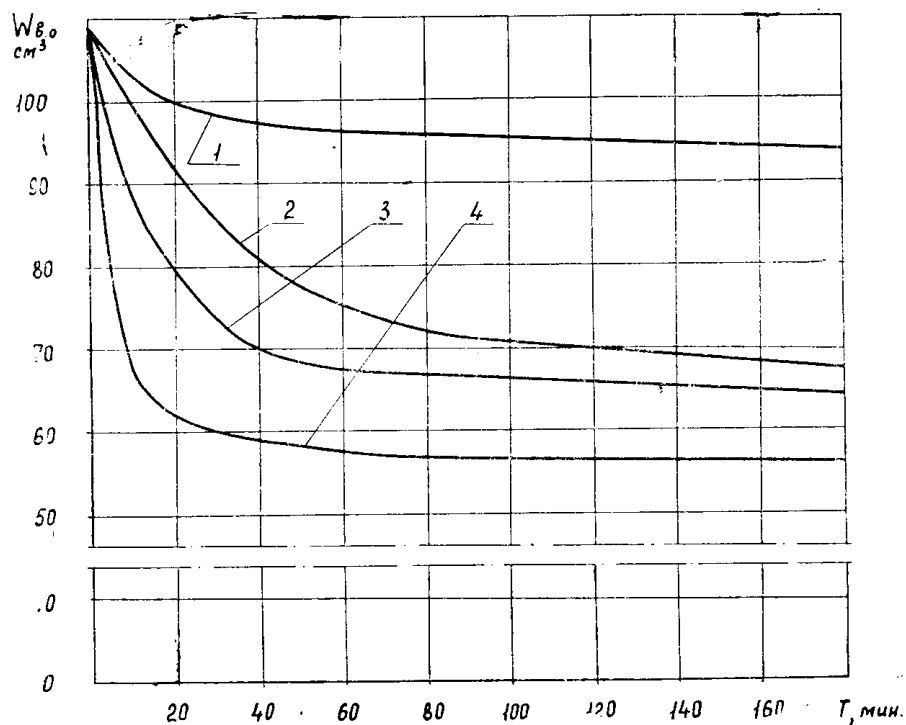


Рис. 3. Зависимость количества нерастворенного воздуха в приборе от времени выдержки под давлением. Давление $p_0 = 42 \text{ кг/см}^2$; $t = 19^\circ \text{C}$; рабочая жидкость — масло В 3 в состоянии поставки; 1 — статическое давление, 2 — давление, изменяющееся по синусоиде с частотой $f = 8 \text{ гц}$ и амплитудой $\Delta p = 1,4 \text{ кг/см}^2$; 3 — $f = 25 \text{ гц}$; $\Delta p = 1,4 \text{ кг/см}^2$; 4 — $f = 42 \text{ гц}$; $\Delta p = 1,4 \text{ кг/см}^2$.

может быть произведен по формуле (7), а для схемы на рис. 1, б расчет $E_{\Sigma a_i}$ — по формуле (8).

2. При динамическом изменении давления в интервале $0 < \frac{dp}{dt} \leq 300 \text{ кг/см}^2 \text{ сек}$ показатель $n \approx 1$. Уточнение значения n при $\frac{dp}{dt} > 300 \div 500 \text{ кг/см}^2 \text{ сек}$ требует проведения дополнительных опытов.

3. При $n \approx 1$ количество нерастворенного воздуха, находящегося в рабочей жидкости гидросистемы, можно определить по формулам: для схемы по рис. 1, а

$$W_{B_0} = \frac{W_{ж_0} \left[1 - \frac{E_{\Sigma a_i}}{E_{ж}} \right] \cdot \left[1 - \frac{p_i - p_0}{E_{ж}} \right]}{\frac{p_0}{p_i} \left[\frac{E_{\Sigma a_i}}{p_i} - 1 \right]}, \quad (9)$$

для схемы по рис. 1, б

$$W_{B_0} = \frac{W_{ж_0} \left(1 - \frac{E_{\Sigma \delta_i}}{E_{ж}} \right)}{\frac{E_{\Sigma \delta_i}}{E_{ж}} \left(1 - \frac{p_0}{p_i} \right) + E_{\Sigma \delta_i} \frac{p_0}{p_i^2} - 1}. \quad (10)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Т. М. Башта. Расчет и конструирование самолетных гидравлических систем. Машгиз, М., 1962.
2. Д. Блэкборн. Гидравлические и пневматические силовые системы управления. ИЛ, М., 1962.
3. В. Н. Прокофьев, И. А. Лузанова. Определение критерия упругости гидропривода. Изв. вузов, «Машиностроение», № 7, 1966.
4. Хаттон. Жидкости для гидравлических систем. Изд. «Химия», 1966.
5. Rendel D., Allen G. R. Air in Hydraulic Transmission systems. Aircraft Engng., V., XXIII, November, 1951.
6. Hayward A. I. I. How air bubbles affect the compressibility of hydraulic oil. Hydraulic, power transmission, 1962, vol. 8, № 20.