

КУДАШЕВ С. Ф., ЛАПИН Е. С., ПАНКРАТЬЕВ Р. В.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Аннотация. Нестационарные процессы в гидравлических системах удобно рассматривать с помощью теории энергетических цепей. В работе получены теоретические амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой гидравлической системы, определено влияние массы жидкости и податливости трубопроводов на амплитудно-частотную характеристику. Представлены результаты экспериментального исследования амплитудно-частотной характеристики рассматриваемой гидравлической системы.

Ключевые слова: теплоноситель, импульс, амплитудно-частотная характеристика, энергетическая цепь.

KUDASHEV S. F., LAPIN E. S., PANKRATIEV R. V.

THE ENERGY CHAIN OF PLATE HEAT EXCHANGER AT PULSE MODE OF COOLANT FLOW

Abstract. The theory of energy chains is used to consider the non-stationary processes in hydraulic systems. The paper presents the theoretical frequency response of the hydraulic system considered. The authors also calculate the influence of fluid mass and pipeline compliance on the frequency response. Consequently, the experimental study presents the frequency response of the hydraulic system considered.

Keywords: coolant, pulse, frequency response, energy chain.

Гидравлические процессы в контуре с двухклапанным преобразователем потока (ПП) удобно анализировать с помощью теории цепей [1]. Энергетическая цепь гидравлической сети, состоящей из теплообменника и подводящего трубопровода, представлена на рис. 1, она включает два звена. Теплообменник с податливостью пластин l_1 , массой воды в каналах m_1 , активным гидравлическим сопротивлением r_1 , соединительный трубопровод с массой воды m_2 , активным гидравлическим сопротивлением r_2 , податливостью материала трубопровода l_2 .

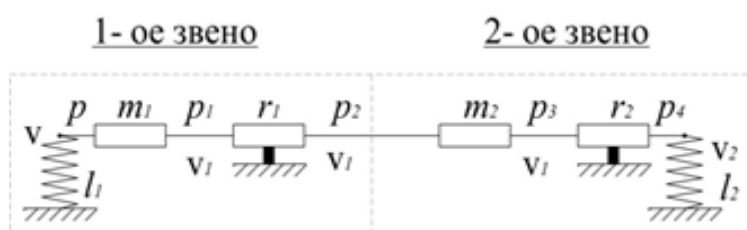


Рис. 1. Гидравлическая цепь подводящего трубопровода с установленным на нем теплообменником.

Уравнение звеньев цепи:

$$\begin{cases} p = m_1 \dot{v}_1 + r_1 v_1^2 + p_2, \\ v = l_1 \dot{p} + v_1, \end{cases} \quad \begin{cases} p_2 = m_2 \dot{v}_1 + r_2 v_1^2 + p_4, \\ v_1 = l_2 \dot{p}_4 + v_2. \end{cases} \quad (1)$$

где p, p_4 – давление теплоносителя на входе в подводящий трубопровод и на выходе из него соответственно, Па;

v_1, v_2 – объемный расход теплоносителя на входе в подводящий трубопровод и на выходе из него соответственно, м³/с.

Давление и объемный расход на входе в цепь:

$$\begin{cases} p = m_1 \dot{v}_1 + r_1 v_1^2 + m_2 \dot{v}_1 + r_2 v_1^2 + p_4 \\ v = l_1 \dot{p}_2 + l_2 \dot{p}_4 + v_2. \end{cases} \quad (2)$$

Объемный расход и давление теплоносителя было представлено в виде постоянной составляющей и отклонения:

$$v = v_0 + \bar{v}, \quad p = p_0 + \bar{p}. \quad (3)$$

В этом случае ввиду малости $v^2 \approx v_0^2 + 2 v_0 \bar{v}$, $\dot{v} = \dot{\bar{v}}$ и т.п.

Уравнение на давление:

$$\begin{aligned} p = (m_1 l_2 + m_2 l_2) \ddot{\bar{p}}_4 + \bar{p}_4 + p_{40} + (m_2 + m_1) \dot{\bar{v}}_2 + \\ + (2r_1 v_{20} + 2r_2 v_{20}) \bar{v}_2 + (r_1 + r_2) v_{20}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом введенных коэффициентов $a_1 = m_1 l_2 + m_2 l_2$, $a_2 = 1$, $b_1 = m_2 + m_1$, $b_2 = 2r_1 v_{20} + 2r_2 v_{20}$, уравнение (5) представим в виде:

$$p = a_1 \ddot{\bar{p}}_4 + a_2 \bar{p}_4 + a_3 p_{40} + b_1 \dot{\bar{v}}_2 + b_2 \bar{v}_2 + b_3 v_{20}^2. \quad (5)$$

Уравнение на изображения:

$$(a_1 s^2 + a_2) P_4(s) = -(b_1 s + b_2) V_2(s). \quad (6)$$

После соответствующих преобразований комплексное сопротивление цепи:

$$Z(s) = \frac{P_4(s)}{V_2(s)} = \frac{-b_1 s - b_2}{a_1 s^2 + a_2}. \quad (7)$$

Частотная функция:

$$Z(\Omega) = \frac{-b_1 j \Omega - b_2}{-a_1 \Omega^2 + a_2}. \quad (8)$$

Действительная часть частотной функции:

$$U(\Omega) = \frac{b_2}{a_1\Omega^2 - a_2}. \quad (9)$$

Мнимая часть частотной функции:

$$V(\Omega) = \frac{b_1\Omega}{-a_1\Omega^2 + a_2}. \quad (10)$$

Амплитудно-частотная характеристика цепи:

$$A(\Omega) = \sqrt{U^2(\Omega) + V^2(\Omega)}. \quad (11)$$

Фазочастотная характеристика:

$$\varphi(\Omega) = -\arctg \frac{U(\Omega)}{V(\Omega)}. \quad (12)$$

Для построения экспериментальной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) подводящего трубопровода ИТП с установленным на нем теплообменником, необходимо записать мгновенные значения расхода и давления в обоих трубопроводах. Ввиду того, что оба ударных клапана изготовлены одинаково и одинаковы конструкции подводящих трубопроводов, то и АЧХ будут совпадать. В качестве входного сигнала принимаем расход на входе в подводящую трубу к ударному клапану ПП, определяемый при помощи расходомера переменного перепада давления. В качестве выходного сигнала принимаем давление на входе в ударный клапан. Рассматривая полученную систему как черный ящик, будем определять реакцию системы на входное воздействие. Увеличивая расход через ПП от нуля до номинального значения, при помощи штатной арматуры после завершения переходных процессов и выхода системы в установившийся режим (5 мин) производим запись файла данных. Амплитуда колебаний давления определялась как разность между средним по времени значением давления и максимальным значением давления. Частота колебаний определялась по разности времени появления максимумов давления. Результаты экспериментальных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента для построения АЧХ

Эксперимент	Число точек	Т	f	Ω	A _{рас}	A _{давл}	A _{давл} / A _{рас}
		мс	Гц	Рад/с	м ³ /ч	кПа	кПа/(м ³ /ч)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	317,2	3,153	19,801	1,859	284,2	
	2	317,3	3,152	19,795	1,880	284,6	
	3	317,2	3,153	19,801	1,858	283,4	
	4	317,1	3,154	19,807	1,832	265,0	

	cp	317,2	3,153	19,801	1,857	279,3	198,910
2	1	349,2	2,864	17,986	1,431	179,6	
	2	343,6	2,910	18,275	1,400	180,9	
	3	350,8	2,851	17,904	1,427	173,4	
	4	328	3,049	19,148	1,384	173,4	
	cp	342,9	2,916	18,312	1,410	176,8	125,374
3	1	311,2	3,213	20,178	1,601	263,4	
	2	314	3,185	20,002	1,610	267,5	
	3	314,8	3,177	19,952	1,638	274,2	
	4	313,2	3,193	20,052	1,655	259,1	
	cp	313,3	3,192	20,046	1,626	266,9	164,158
4	1	294,8	3,392	21,302	1,767	325,0	
	2	294,4	3,397	21,333	1,798	327,5	
	3	295,2	3,388	21,277	1,792	323,3	
	4	294,4	3,397	21,333	1,759	323,4	
	cp	294,7	3,393	21,308	1,779	324,8	222,042
5	1	281,2	3,556	22,332	2,085	498,3	
	2	281,2	3,556	22,332	2,067	490,8	
	3	281,6	3,551	22,300	2,058	498,3	
	4	280,8	3,561	22,363	2,043	500,8	
	cp	281,2	3,556	22,332	2,063	497,1	242,720
6	1	280	3,571	22,426	2,140	523,2	
	2	278,8	3,587	22,526	2,167	530,0	
	3	278,8	3,587	22,526	2,189	534,2	
	4	279,2	3,582	22,495	2,225	538,9	
	cp	279,2	3,582	22,495	2,180	534,4	247,176
7	1	274,200	3,647	22,903	2,532	625,8	
	2	273,500	3,656	22,960	2,530	627,5	
	3	274,000	3,650	22,922	2,466	635,0	
	4	273,800	3,652	22,935	2,446	631,9	
	cp	273,875	3,651	22,928	2,494	631,5	253,417
8	1	272,4	3,671	23,054	2,703	703,4	
	2	271,6	3,682	23,123	2,725	708,4	
	3	271,2	3,687	23,154	2,740	706,2	
	4	272	3,676	23,085	2,714	710,1	
	cp	271,8	3,679	23,104	2,721	707,0	261,012
9	1	268	3,731	23,431	2,834	730,8	
	2	278,8	3,587	22,526	2,846	729,2	
	3	269,2	3,715	23,330	2,819	735,0	
	4	268	3,731	23,431	2,840	733,2	
	cp	271	3,690	23,173	2,835	732,5	
10	1	333,2	3,001	18,846	1,172	182,5	258,662
	2	331,6	3,016	18,940	1,208	188,4	
	3	330,8	3,023	18,984	1,200	186,7	
	4	332	3,012	18,915	1,191	181,9	
	cp	331,9	3,013	18,922	1,193	185,7	152,525

11	1	364,8	2,741	17,213	1,219	148,4		
	2	371,6	2,691	16,899	1,151	145,9		
	3	377,6	2,648	16,629	1,219	140,0		
	4	370,4	2,700	16,956	1,215	145,8		
	ср	371,3	2,693	16,912	1,201	143,9	121,430	

Из графика (рисунок 2) следует, что с увеличением частоты пульсаций происходит увеличение давления при единичном расходе через систему.

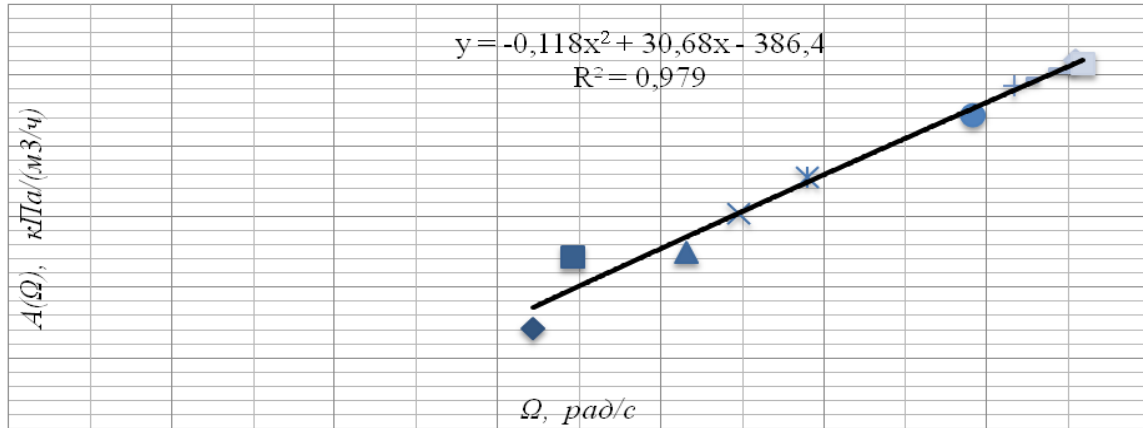


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика подводящего трубопровода с установленным на нем теплообменником.

Совмещенные графики экспериментальной АЧХ и полученных на основании уравнения 12, при подстановке реальных значений параметров, представлены на рис. 3.

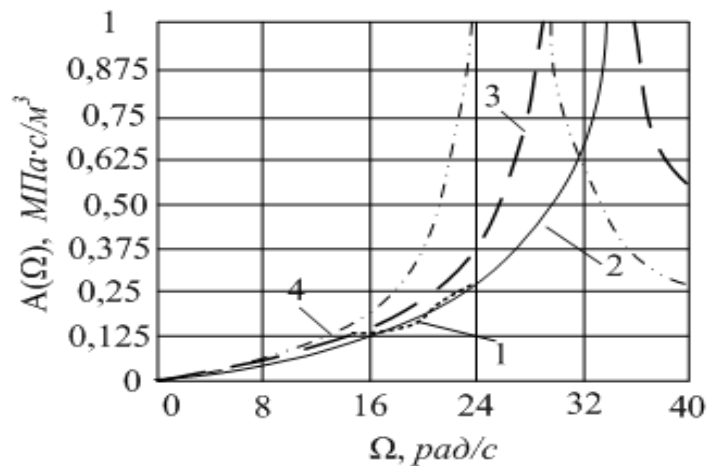


Рис. 3. АЧХ системы: 1 – экспериментальная;

2 – $l_I = 17 \cdot 10^{-4}$ м³/Па; 3 – $l_I = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м³/Па; 4 – $l_I = 6,3 \cdot 10^{-5}$ м³/Па

$m_1 = 60$ кг, $m_2 = 4,5$ кг, $r_1 = 0,1$ Па с/м³, $r_2 = 0,5$ Па с/м³, $l_I = 1,1 \cdot 10^{-4}$ м³/Па.

Значения параметров системы и теплоносителя при импульсной подаче для моделирования АЧХ представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значение параметров для моделирования АЧХ подводящего трубопровода с установленным на нем теплообменником

№ п/п	$r_1, \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}$	$r_2, \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{м}^3}$	$V_0, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$l_1, \frac{\text{м}^3}{\text{Па}}$	$l_2, \frac{\text{м}^3}{\text{Па}}$
1	0,1	0,5	0,07	60	4,5	0,00017	0,00011
2	0,1	0,5	0,07	80	4,5	0,00017	0,00011
3	0,5	0,5	0,07	110	4,5	0,00017	0,00011
4	0,5	0,5	0,07	60	4,5	0,0002	0,00011
5	0,5	0,5	0,07	60	4,5	0,00006	0,00011
6	0,5	0,5	0,07	60	4,5	0,00017	0,00011
7	0,5	0,5	0,07	60	4,5	0,00017	0,00011
8	0,5	0,5	0,1	60	4,5	0,00017	0,00011
9	0,5	0,5	0,15	60	4,5	0,00017	0,00011

Графики теоретических АЧХ подводящего трубопровода с установленным на нем теплообменником, вычисленных в соответствии со значениями параметров для моделирования из таблицы 3, представлены на рисунке 4.

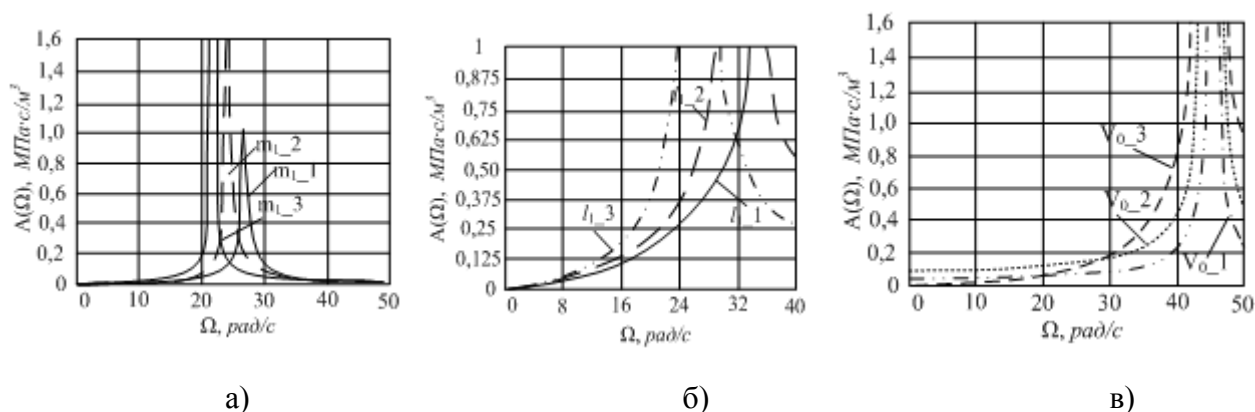


Рис. 4. Теоретические амплитудно-частотные характеристики подводящего трубопровода с установленным на нем теплообменником.

Из графиков видно, что с увеличением массы жидкости в трубопроводе, упругости системы, а также скорости жидкости через ПП происходит увеличение амплитуды колебаний давления при единичном расходе через систему. Это происходит за счет того, что увеличение упругости системы приводит к увеличению скорости распространения упругих

волн в жидкости, увеличение скорости теплоносителя сокращает время закрытия ударных клапанов, а увеличение массы жидкости при постоянных параметрах системы (длина трубопроводов их диаметр и т.д.) возможно только с изменением плотности теплоносителя, что и влияет на скорость распространения упругих волн в жидкости. С изменением гидравлического сопротивления системы АЧХ меняется незначительно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карм Дж. Т., Франк М. Е. Частотные характеристики пневматических линий передач // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1967. – № 2. – С. 149-163.