

задачи состоит из трех дуг: первая угловая точка определяется уравнением (5), вторая - (3), минимальное значение функционала - (4) с учетом (7).

Величины  $v_*$  и  $v_{*0}$  для оптимального режима при различных значениях  $z_k$  и  $\tau_k$  представлены графиком (рис.1). Там же для наглядности изображена гиперболическая тангенсоида  $v_* = th \tau_{01}$ . На рис.2 приведены значения  $A_0 = A_0(z_k, \tau_k)$ , а на рис.3 - отношение  $A_0$  к значению  $A$  при  $D = const$ :  $A_0/A_c = f(z_k, \tau_k)$ . Как видно из последнего, оптимальное управление наиболее эффективно при малых  $z_k$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

Кротов В.Ф., Букреев В.З., Турман В.И. Новые методы вариационного исчисления в динамике полета. М., "Машиностроение", 1969.

Г.Д. Никитина, А.Г. Смирнов

#### ЗАТУХАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЖИДКОСТИ В U-ОБРАЗНОЙ ТРУБЕ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Режим течения несжимаемой вязкой жидкости при свободных колебаниях в U-образных трубах определяется критериальным числом Валанси  $Wa = l^2 \omega_0 / \nu$  [1,2], где  $l$  - характерный линейный размер,  $\omega_0 = \sqrt{2g/L}$  - собственная частота колебаний,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $L$  - длина колеблющегося столба жидкости,  $\nu$  - кинематическая вязкость. Число Валанси является аналогом числа Рейнольдса. При  $Wa < 40$  течение ламинарное, при  $Wa > 70$  - турбулентное. Диапазону чисел Валанси  $40 < Wa < 70$  соответствует переходный режим течения. Параметры колеблющегося столба жидкости различны для этих режимов. Исследование затухания  $A = z_n / z_{n+1}$ , определяемого отношением предыдущей амплитуды колебаний  $z_n$  к последующей  $z_{n+1}$ , проведено для круглых стеклянных труб с гладкой внутренней поверхностью в широком диапазоне чисел Валанси [3].

Типичные зависимости затухания от амплитуды для труб с гладкой поверхностью приведены на рис.1.

Шероховатость внутренней поверхности труб оказывает существенное влияние на затухание колебаний. Исследование затухания проведено для пяти труб прямоугольного сечения, изготовленных из органического стекла, и для трубы круглого сечения, изготовленной из жаропрочного стекла. Шероховатость внутренней поверхности была получена различной механической обработкой. Геометрические характеристики труб и данные о шероховатости их внутренней поверхности приведены в таблице. Характерным линейным размером для трубы круглого сечения является внутренний радиус  $r_0$ , для труб прямоугольного сечения - эквивалентный радиус  $r_{э.к.б.}$ . Широкий диапазон чисел Валанси для трубы с постоянными геометрическими размерами получен за счет использования жидкостей с различной вязкостью и исследования колебаний столбов жидкости различной длины. В качестве исследуемых жидкостей использовались дистиллированная вода и водные растворы глицерина следующих весовых процентных концентраций: 40, 59, 75. Длина колеблющихся столбов жидкости изменялась от 18 до 110 см. Начальная амплитуда колебаний 16 мм.

Для трубы № 1 исследования проведены в диапазоне чисел Валанси  $890 \pm 19$ . При больших числах Валанси ( $890 \pm 290$ ) в начале процесса колебаний затухание постоянно (рис.2). При переходе к менисковым колебаниям затухание ~~постоянно~~ увеличивается переходя через максимум, при малых амплитудах ослабевает. В диапазоне чисел Валанси  $141,8 \pm 58,2$  затухание постоянно при больших и средних амплитудах и убывает при малых. При ламинарном течении ( $Wa = 19$ ) оно монотонно уменьшается с уменьшением амплитуды колебаний. Затухание начала процесса колебаний при турбулентном течении изме-

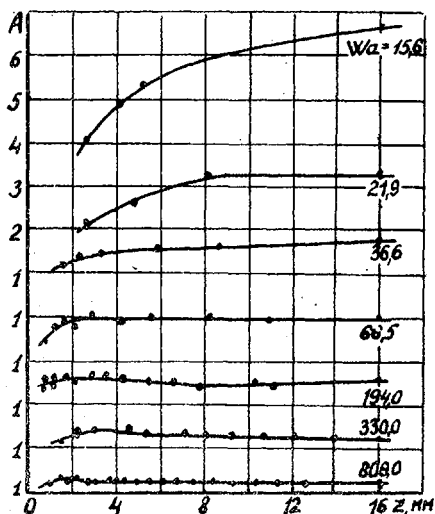


Рис.1. Затухание в гладкой круглой трубе

няется незначительно, увеличиваясь от 1,50 для  $Wa = 890$  до 1,67 для  $Wa = 95,3$ . В переходном режиме и при ламинарном течении затухание увеличивается с уменьшением числа Валанси.

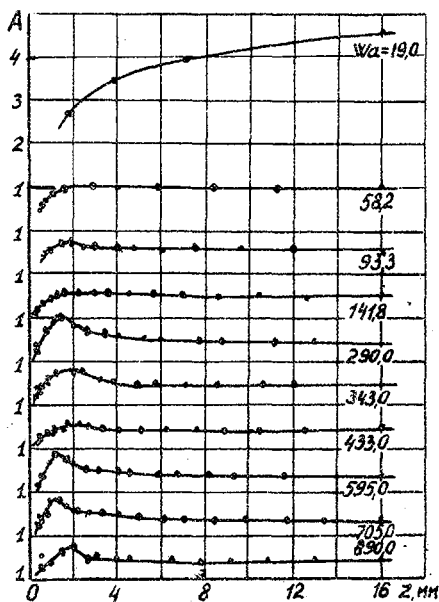


Рис.2. Затухание в шероховатой прямоугольной трубе № 1

В переходном режиме течения ( $Wa = 43,5 + 63,5$ ) затухание постоянно при больших и средних и уменьшается при малых амплитудах колебаний.

При ламинарном течении затухание монотонно убывает с уменьшением амплитуды. Затухание первого колебания при турбулентном течении изменяется незначительно, увеличиваясь от 1,46 для  $Wa = 792$  до 1,85 для  $Wa = 108,9$ . В переходном режиме и при ламинарном течении оно быстро увеличивается от 2,40 для  $Wa = 63,5$  до 16,85 для  $Wa = 17,7$ .

Для трубы № 3 исследования проведены в диапазоне чисел Валанси  $933,6 + 16,3$ . При турбулентном режиме течения вид зависимости  $A = f(z)$  тот же, что и для трубы № 2. Однако относительное

Для трубы № 2 исследования проведены в диапазоне чисел Валанси  $792 + 12,2$ . При больших числах ( $792 + 368,9$ ) для нескольких первых колебаний затухание постоянно. Затем оно увеличивается, переходя через максимум, при малых амплитудах - быстро уменьшается. В зависимости  $A = f(z)$  появляются характерные "пики". Увеличение затухания на  $20 + 80\%$  по сравнению с затуханием начала процесса колебаний происходит при средних амплитудах. С уменьшением числа Валанси увеличение затухания выражено гораздо слабее. В диапазоне чисел Валанси  $231,5 + 92,4$  затухание при средних амплитудах колебаний увеличивается на  $6 + 14\%$  по сравнению с начальным.

Параметры экспериментального участка

Тру- ба	Размеры поперечного сечения трубы			Радиус $r$ , см	Эквивалентный радиус $r_{экв}$ , см	Рассто- яние меж- ду ося- ми колен $L$ , см	Высота верти- кально- го уча- стка $H$ , см	Средне- арифме- тическое отложе- ние про- филя $R_a$ , мм	Высота неров- ностей $R_z$ , мм	Класс чистоты поверх- ности
	Длина $a$ , см	Ширина $b$ , см	Радиус $r$ , см							
1	-	4,80	3,00	1,85	11,5	50,0	0,04	0,2	v 12	
2	-	1,19	4,22	0,93	9,8	50,0	0,43	3,0	v 8	
3	-	2,29	2,00	1,07	10,1	50,0	-	24,2	v 4	
4	-	1,00	2,48	0,71	10,0	50,0	-	111,0	v 2	
5	-	1,02	1,29	0,57	8,4	50,0	-	344,0	-	
6	1,01	-	-	-	10,0	50,0	-	25,0	-	

увеличение затухания при средних амплитудах колебаний больше, чем в соответствующих диапазонах чисел  $Wa$  для трубы № 2. Например, при  $Wa = 492,6 + 690,6$  затухание увеличивается на  $62+90\%$ , при  $Wa = 81,4 + 275,7$  на  $21 + 54\%$ . В переходном режиме течения ( $Wa = 58,1 + 66,4$ ) оно по сравнению с начальным для нескольких первых колебаний и увеличивается на  $13 + 33\%$  при средних амплитудах, переходя через максимум. Для малых амплитуд характерно уменьшение затухания. При ламинарном течении затухание монотонно ослабевает с уменьшением амплитуды. Затухание первого колебания при турбулентном течении изменяется незначительно от  $1,51$  для  $Wa = 933,6$  до  $1,71$  для  $Wa = 110,0$ . В переходном режиме и при ламинарном течении затухание первого колебания быстро увеличивается от  $1,91$  для  $Wa = 66,4$  до  $13,10$  для  $Wa = 16,3$ .

Для трубы № 4 исследования проведены в диапазоне чисел Валанси  $434,6 + 8,2$ . Вид зависимости  $A=f(z)$  для турбулентного, переходного и ламинарного режимов течения тот же, что и для трубы № 3. Относительное увеличение затухания при средних амплитудах колебаний выражено гораздо сильнее, чем для труб № 2 и № 3. Например, в диапазоне чисел Валанси  $303,1 + 434,6$  затухание увеличивается на  $93 + 144\%$ , при  $Wa = 89,5 + 248,1$  на  $54 + 87\%$ , при  $Wa = 54,9 + 72,3$  - на  $11 + 47\%$ .

Для трубы № 5, обработка внутренней поверхности которой весьма груба и высота микронеровностей достигает  $344$  мкм, исследования проведены в диапазоне чисел Валанси  $275,5 + 9,1$ . Типичные зависимости затухания  $A$  от текущей амплитуды  $z$  для этой трубы приведены на рис. 3. При турбулентном течении и в переходном режиме ( $Wa = 46,2 + 275,5$ ) затухание быстро увеличивается с уменьшением амплитуды, переходя через максимум, а затем резко уменьшается. В диапазоне чисел Валанси  $138,1 + 275,5$  увеличение затухания при средних амплитудах происходит на  $60 + 160\%$  по сравнению с затуханием первого колебания. В переходном режиме течения ( $Wa = 46,2 + 57,8$ ) затухание при средних амплитудах на  $43 + 64\%$  больше начального. При ламинарном течении ( $Wa = 35,4 + 20,2$ ) и малых амплитудах колебаний затухание постоянно для нескольких первых колебаний и убывает с уменьшением амплитуды.

Исследования для круглых труб проведены в диапазоне чисел Валанси  $51,4 + 785$ . Высота микронеровностей внутренней поверхности здесь достигала  $25$  мкм. Типичные зависимости затухания от амплитуды приведены на рис. 4. Характер зависимостей  $A = f(z)$  тот же, что и для прямоугольных труб № 3 и № 4.

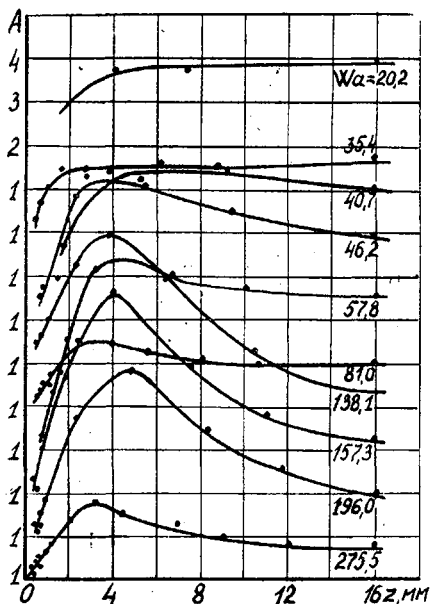


Рис. 3. Затухание в шероховатой прямоугольной трубе №5

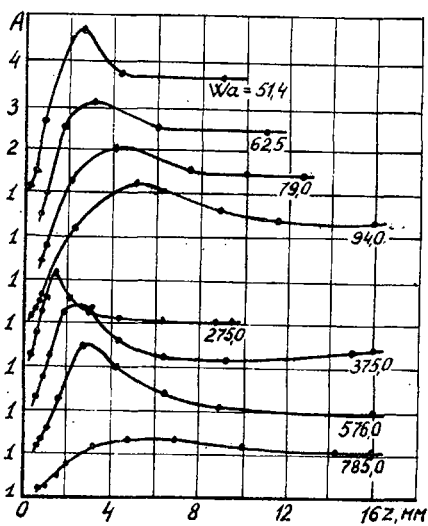


Рис. 4. Затухание в шероховатой круглой трубе

Таким образом, шероховатость внутренней поверхности труб оказывает существенное влияние на затухание колебаний жидкости в  $U$  - образных трубах при турбулентном течении. Значения затухания при больших амплитудах колебаний с ростом числа Валанси стремятся к постоянной величине. Этот предел тем больше, чем больше шероховатость. В зависимости  $A = f(z)$  наблюдаются характерные "пики": при средних амплитудах колебаний затухание увеличивается, переходя через максимум. Высота "пиков" возрастает с шероховатостью поверхности. Для всех шероховатых труб отмечена следующая особенность: при использовании жидкости с одной и той же вязкостью на относительное увеличение затухания при средних амплитудах колебаний оказывает влияние длина колеблющегося столба, т.е. с увеличением её увеличивается и относительное затухание. Этот факт указывает на то, что критерийное число Валанси  $Wa = \ell^2 \omega_0 / \nu$ , где в качестве характерного линейного размера  $\ell$  используется внутренний радиус трубы, не полностью отражает динамику колебаний вязкой жидкости в  $U$  - образных трубах.

В переходном режиме течения на затухающие колебания оказывает влияние только сравнительно большая шероховатость соответствующая классу чистоты поверхности  $\nabla 2$  и ниже.

При ламинарном течении шероховатость не оказывает влияния на затухание колебаний. Трубы можно считать гидродинамически гладкими.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Valensi G. *Oscillation d'un liquide pesant et visqueux dans un tube en U de faible diamétre, paramétre de similitude, crite're de transition, C. r. Acad. Sci., 224, 1947*
2. Valensi G., Clazion C. *Oscillation d'un liquid pesant et visqueux dans un tube en U de faible diamétre (II, verification experimentale), paramétre de similitude, crite're de transition, C. r. Acad. Sci., 224, 1947.*
3. Кравченко А.Е., Смирнов А.Г. Экспериментальные исследования свободных затухающих колебаний жидкости в U - образных круглых трубах. Сб.: "Физическая гидродинамика и кинетика жидкости", Ростов-на-Дону, 1968.

А.И. Белоусов, Д.Е. Чегодаев

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР С УЧЕТОМ ЦЕНТРИРОВАНИЯ

П р и н я т ы е   о б о з н а ч е н и я

$D$  - диаметр плунжера;  $L$  - длина камеры;  $l$  - длина выходной щели;  $l^*$  - расстояние от торца плунжера до центрирующих отверстий;  $\chi = l/L$  - относительный ход плунжера;  $\chi^* = l^*/L$  - относительное расстояние центрирующих отверстий от торца плунжера;  $\delta_0$  - величина радиального зазора при концентричном положении поршня в обойме;  $\delta$  - текущая величина радиального зазора;  $d_{жк}$  - диаметр