

УДК 532.592.2

ГИДРОМЕХАНИКА

В. Г. ИВАННИКОВ, Г. Д. РОЗЕНБЕРГ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕЧЕНИЯ СЛАБЫХ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРОВ

(Представлено академиком Л. И. Седовым 18 IV 1973)

В настоящей статье излагаются результаты исследования затухания скачка давления в слабых растворах полиакриламида (ПАА, обработка СТУ12 № 02 21-64).

Уравнения неустановившегося течения упругой вязкой жидкости в упругой трубе при неравномерном распределении скоростей по ее сечению и скорости течения, много меньшей скорости звука, имеют вид ⁽¹⁾

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\lambda |w|}{8\delta} w \right), \quad -\frac{\partial p}{\partial t} = \rho c^2 \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (1)$$

где p , ρ , w — соответственно давление, плотность и скорость течения жидкости, средние в сечении трубы; c — приведенная скорость звука; δ — гидравлический радиус; λ — коэффициент гидравлического сопротивления (предполагается, что значения λ при установившемся и неустановившемся течениях зависят от w одинаковым образом — гипотеза квазистационарности). Можно показать, что (1) будут справедливы также при течении неньютоновских жидкостей, в частности, растворов полимеров, причем введение гипотезы квазистационарности не является обязательным ⁽²⁾.

Для головных значений волн давления при линеаризованном и квадратичном законах трения имеем соответственно ⁽³⁾

$$\bar{p} = \bar{p}_1 e^{-kx}, \quad \bar{p} = \bar{p}_1 e^{-m(x)x}, \quad (2)$$

где

$$k = a/c, \quad a = \lambda_0 |w_0| / (8\delta), \quad (3)$$

$$m(x) = \frac{a}{c} + \frac{1}{x} \ln \left[1 + \frac{\bar{w}}{2w_0} \left(1 - \exp \left(-\frac{a}{c} x \right) \right) \right], \quad (4)$$

$\bar{p}$ — возмущение давления над его стационарным значением, $\bar{p}_1$, $\bar{w}_1$ — возмущения давления и скорости в сечении $x=0$, w_0 — стационарное значение скорости, λ_0 — коэффициент гидравлического сопротивления при $w=w_0$.

Из (4) следует, что

$$m(0) = \frac{a}{c} \left(1 + \frac{\bar{w}_1}{2w_0} \right), \quad m(\infty) = \frac{a}{c},$$

т. е. с ростом x разница между коэффициентами затухания при линеаризованном и квадратичном законах трения, т. е. между a/c и $m(x)$, уменьшается. Так как при торможении потока $0 \leq \bar{w}_1 < w_0$ ($-w_0 \leq \bar{w}_1 < 0$), то

$$1/2 a/c \leq m(0) < a/c.$$

Экспериментальное исследование затухания скачка давления было предпринято с целью проверки справедливости гипотезы квазистационарности при течении слабых растворов полимеров.

Экспериментальная установка (см. рис. 1) состояла из напорного бака 1, самотечного стального трубопровода 2 диаметром 25 мм и длиной

110 м, быстродействующего затвора 3 (время срабатывания $5 \cdot 10^{-3}$ сек.) и мерной емкости 4. При закрытии затвора в трубе возникал гидравлический удар с достаточно крутым фронтом.

Давления по концам мерного участка I—II длиной $l=73,4$ м при стационарном течении измерялись образцовыми манометрами 5 (при малых скоростях течения — ртутным дифманометром), а при нестационарном — индуктивными датчиками ДД-10. Сигналы от датчиков усиливались индикатором ИД-2И и регистрировались светолучевым осциллографом. Расход жидкости определялся объемным способом.

Экспериментальная установка была протарирована на воде. При этом измеренная скорость звука отличалась от расчетной не более чем на 0,5%,

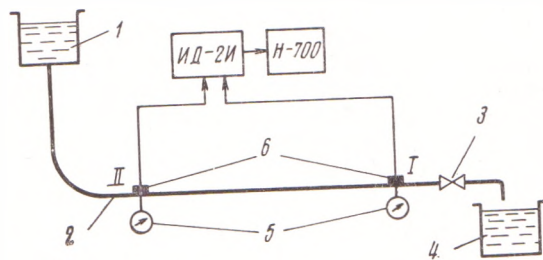


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

а ударное давление от рассчитанного по формуле Жуковского — не более чем на 2%.

Экспериментальные значения коэффициента затухания k_3 определялись в соответствии с (2) как

$$k_3 = (\ln \bar{p}_1 - \ln \bar{p}_2) / l, \quad (5)$$

где $\bar{p}_2$ — возмущение давления в сечении II (см. рис. 1).

Все опыты повторялись многократно, что позволило провести статистическую обработку результатов эксперимента. В процессе обработки выяснилось, что во всех случаях имело место соотношение $\sigma = (\pi/2)^{1/2} \eta$, где σ — средняя квадратическая, η — средняя арифметическая ошибка отдельного измерения, т. е. распределение ошибок следовало нормальному закону.

Для сравнения с экспериментом были подсчитаны теоретические значения коэффициентов затухания: для линеаризованного закона трения по

Таблица 1

Рабочая жидкость	$C, \%$	$w_0,$ м/сек	n	$k_3 \cdot 10^4, \text{ м}^{-1}$	$k \cdot 10^4,$ м^{-1}	$m \cdot 10^4,$ м^{-1}	k_3/k
Вода		1,30	25	$5,15 (1 \pm 0,02)$	4,75	2,35	1,08
		1,62	30	$5,75 (1 \pm 0,01)$	5,81	2,75	0,99
ПАА	0,03	1,57	23	$5,28 (1 \pm 0,02)$	2,24	1,11	2,36
		1,51	23	$5,05 (1 \pm 0,02)$	2,58	1,27	1,96
		1,57	30	$5,53 (1 \pm 0,03)$	2,03	1,01	2,72
		1,56	25	$5,28 (1 \pm 0,03)$	1,87	0,93	2,82
		1,60	26	$5,39 (1 \pm 0,03)$	2,24	1,11	2,41
		1,54	28	$4,29 (1 \pm 0,03)$	2,40	1,19	1,79
	0,020	1,53	29	$4,68 (1 \pm 0,02)$	2,57	1,27	1,82
		1,58	25	$4,98 (1 \pm 0,04)$	2,68	1,33	1,86
	0,01	1,54	30	$4,83 (1 \pm 0,03)$	2,85	1,41	1,69
		1,60	24	$4,56 (1 \pm 0,03)$	2,91	1,44	1,57
	0,005	1,59	19	$4,96 (1 \pm 0,004)$	2,96	1,46	1,67
		1,58	25	$5,27 (1 \pm 0,02)$	2,93	1,45	1,80
	0,001	1,53	23	$5,11 (1 \pm 0,02)$	3,50	1,73	1,46
		1,63	16	$5,28 (1 \pm 0,02)$	4,45	2,20	1,19
	0,0005						

формуле (3), а для квадратичного — по формуле (4) при $x=l$, величина λ_0 определялась при этом из эксперимента. Результаты этих расчетов, экспериментальные значения коэффициента затухания k_3 , а также значения концентрации раствора полимера C , скорости стационарного течения w_0 , число опытов n при данной скорости w_0 приведены в табл. 1 и на рис. 2. Значения коэффициента гидравлического сопротивления при течении воды $\lambda_{0в}$ и раствора полимера $\lambda_{0п}$ определены экспериментально при условии $w_{0в} = w_{0п}$, где $w_{0в}$, $w_{0п}$ — стационарная скорость течения воды и раствора полимера соответственно.

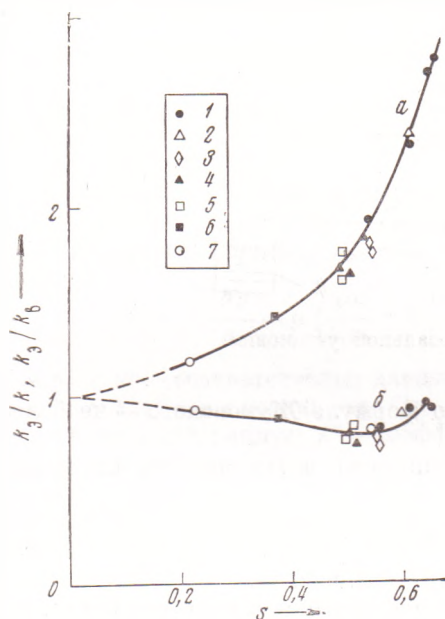


Рис. 2

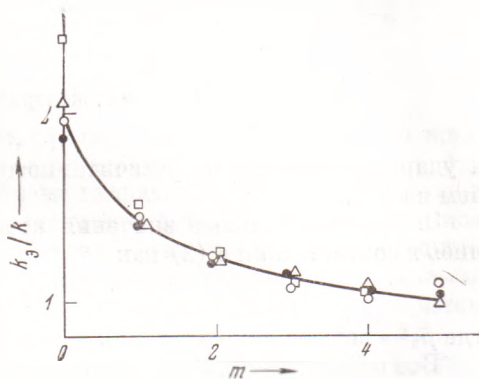


Рис. 3

Рис. 2. Зависимость отношений k_3/k (а) и $k_3/k_в$ (б) от величины относительного снижения сопротивления $s=1-\lambda_{0п}/\lambda_{0в}$ при течении раствора ПАА различной концентрации (г/см³): 1 — $3 \cdot 10^{-4}$, 2 — $2 \cdot 10^{-4}$, 3 — $1 \cdot 10^{-4}$, 4 — $5 \cdot 10^{-5}$, 5 — $25 \cdot 10^{-6}$, 6 — $1 \cdot 10^{-5}$, 7 — $5 \cdot 10^{-6}$.

Рис. 3. Зависимость отношения k_3/k от числа перекачек m всего объема раствора ПАА с начальной концентрацией $C=3 \cdot 10^{-4}$ г/см³ для 4 серий одинаковых опытов.

Из табл. 1 и рис. 2 следует, что в отличие от воды, при течении слабых растворов ПАА гипотеза квазистационарности неприменима.

Одновременно с описанными экспериментами было проведено исследование влияния деградации раствора полимера ($C=0,03\%$) на коэффициент затухания. Деградация раствора происходила при его перекачке из мерной емкости 4 в напорный бак 1 быстроходным центробежным насосом.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Из этого графика видно, что по мере деградации раствора полимера коэффициент затухания приближается к коэффициенту затухания воды.

Московский институт нефтехимической
и газовой промышленности
им. И. М. Губкина

Поступило
17 IV 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. А. Чарный, Неуставившееся движение реальной жидкости в трубах, М.—Л., 1951. ² Г. Д. Розенберг, Изв. высш. учебн. завед., Нефть и газ, № 8 (1959). ³ И. А. Чарный, Г. Д. Розенберг, Приложение к книге Л. Бергерон: От гидравлического удара в трубах до разряда в электрической сети, М., 1962.