

С. П. КОЗЫРЕВ, К. К. ШАЛЬНЕВ

РЕЛАКСАЦИОННАЯ ГИПОТЕЗА МЕХАНИЗМА СОУДАРЕНИЯ
ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

(Представлено академиком П. Я. Кочиной 4 XI 1969)

Характерной особенностью удара малогабаритных объемов жидкости о твердое тело (капель, струй) являются наличие пика давления на осциллографической кривой зависимости $p(\tau)$, где p — гидромеханическое давление жидкости на тело и τ — время соударения (рис. 1). Это свойство соударения обнаруживалось разными авторами при разных условиях опытов (табл. 1).

Авторы (1) ставили опыты с ударом коротких цилиндрических струй, направленных нормально к поверхности датчика, воспринимающей давление. Авторы (2) и данной статьи действовали ударом поверхности датчика, направленной нормально оси струи. В табл. 1 обозначено: d — диаметр струи, v — скорость соударения, P — пиковое давление, τ_1 — время нарастания пика давления, τ_2 — время падения пикового давления, τ_3 — полное время соприкосновения струи с телом. Сумма $\tau_1 + \tau_2 = \Delta\tau$ представляет продолжительность импульса давления. Для струй малого диаметра $\Delta\tau = 3 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-6}$ сек. и для струй большого диаметра $\Delta\tau = 22 \cdot 10^{-6} \div 25 \cdot 10^{-6}$ сек. при соответственном времени $\tau_3 = 20 \cdot 10^{-6} \div 95 \cdot 10^{-6}$ сек. Такая большая разница времени $\Delta\tau$ и τ_3 вызывала недоумение у исследователей проблемы соударения и не находила объяснения (1). Между тем величина $\Delta\tau$ имеет важное значение для расчета нагрузки при соударении струи и твердого тела, так как импульсное давление

$$P = mv / \Delta\tau, \quad (1)$$

где m — масса объема жидкости, ударяющей о твердое тело.

В данной статье предлагается релаксационная гипотеза происхождения пикового давления и продолжительности импульса давления при соударении жидкости и твердого тела. Согласно этой гипотезе в период τ_1 струя упруго деформируется, а в период τ_2 происходит падение напряжения соударения. Согласно нашей релаксационной гипотезе соударения, τ_1 — время отрицательной релаксации, τ_2 — время положительной релаксации, понимая под первым термином время нарастания напряжения, под последним — время падения напряжения от сил вязкости (3). Время $\Delta\tau = \tau_r$ — полное время релаксации.

Согласно (3), время сдвиговой релаксации выражается формулой

$$\tau_{r1} = \eta' W / 6KT$$

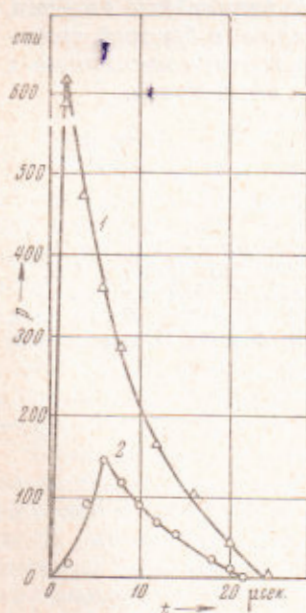


Рис. 1. Осциллографические записи соударения водной струи о твердое тело по данным настоящей работы (табл. 1). Точки на кривых обозначают величины p , полученные из нескольких осциллографических записей: 1 — $v = 64$ м·сек⁻¹, 2 — $v = 32$ м·сек⁻¹

Согласно (3), время сдвиговой релаксации выражается формулой

и объемной релаксации

$$\tau_{r2} = \eta'' c^{-2} q^{-1}.$$

Так как согласно нашей гипотезе в формуле (1) величина $\Delta t = \tau_{r1}$ или $\Delta t = \tau_{r2}$, то импульс давления будет зависеть по крайней мере от следующих физических свойств жидкостей: сдвиговой вязкости η' , коэффициента вращательного трения молекул W , константы Больцмана K , абсолютной температуры T , объемной вязкости η'' , скорости звука c , плотности жидкости q .

Приведем несколько экспериментальных данных, подтверждающих релаксационную гипотезу соударения.

1. Опыты с кино съемкой соударения жидкости и твердого тела (рис. 2) выполнены прежде (4) и повторены авторами, но по другой методике. В качестве жидкости использовалась смесь канифоли и минерального масла при температуре 20°. Струя вытекала под давлением 5 ати из сопла диаметром 8 мм, диаметр струи 8—10 мм. В качестве твердого тела использовалась цилиндрическая пуля диаметром 15 мм, выстреливаемая из ружья. Скорость кино съемки равнялась 8000 кадр·сек⁻¹.

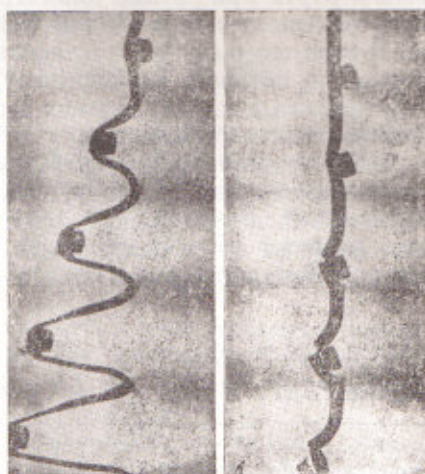


Рис. 2. Киносъемка соударения пули со струей раствора канифоли в минеральном масле

На рис. 2а показан процесс соударения при скорости 9 м·сек⁻¹, когда струя деформируется пластически. На рис. 2б показан процесс хрупкого разрушения струи при соударении со скоростью 15 м·сек⁻¹. В момент соприкосновения пули со струей сначала наблюдается упругая деформация в виде вмятины в боковую поверхность струи, она возникает за время $\tau_1 \leq 1 \cdot 10^{-4}$ сек. (рис. 2б, первый кадр). На последующих кадрах показано хрупкое разрушение струи в виде срезывания как твердого тела. Процесс срезывания виден на трех кадрах и продолжается не менее $3 \cdot 10^{-4}$ сек., т. е. за время, близкое τ_2 для данной жидкости.

Таблица 1

Лит. источник	d, мм	v, м·сек ⁻¹	P	$\tau \cdot 10^4$, сек.			
				τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
(1)	1,3—3,1	720	630 кг	1,0	2,0—3,0	20	3,0—4,0
(2)	1,3	61	37 кг	1,25	3,75	20	5
Данная работа	8,0	64	640 ати	2,5	22,5	90	25
		32	150 ати	6,0	16,5		

2. Продолжительность падения напряжения в водяных струях по опытам (1, 2) равна $\tau_2 = 2 \cdot 10^{-6} \div 3,5 \cdot 10^{-6}$ сек. и находится в пределах ширины спектра релаксационных времен, которые, согласно (3), могут лежать в пределах 5—7 декад.

3. Согласно работе (2), вид плоской поверхности алюминиевого листа после удара водяной струей почти тождествен виду при вдавливании стального стержня боковой поверхностью и диаметром, приблизительно равным диаметру струи. Здесь речь идет о язвочках, образующихся на образце на некотором расстоянии от границы соприкосновения струи с твердым телом.

Их происхождение можно объяснить, в противоположность мнению авторов (2), не действием потока при растекании струи после ее релаксации, а действием поперечных волн давления в струе в тот период, когда она отвердевает вследствие релаксации. Возможно также объяснить действием волн напряжений при соударении твердых тел, подобно тому, как это описано в работе (5).

4. Постоянство угла «растекания» струи, описанного в работе (2) для воды и ртути при разных диаметрах струи и скоростях соударения, может быть объяснено тем, что время релаксации для воды и ртути одного порядка. В этом случае угол «растекания» характеризует величину упругой деформации, которая, по-видимому, мало зависит от рода жидкости и от относительных геометрических размеров струй вследствие близких упругих свойств после их отвердения.

5. В качестве подтверждения справедливости формулы (1) для вычисления импульсного давления, если известно время Δt , приведем результаты подсчетов P по материалам наших опытов и др. (1, 2). Сводка используемых величин по данным опытов и полученных расчетом приводится в табл. 2. Дополнительные обозначения в табл. 2: P_m — средняя величина

Таблица 2

Лит. источник	v , м·сек ⁻¹	P_m	d , мм	d_i , мм	l , мм	$V \cdot 10^3$, мм ³	$m \cdot 10^3$, кг·сек ⁻²	$\Delta t \cdot 10^6$, сек.	P_r
Данная работа	64	200 ати	8	4	7,6	97	9,9	25	193 ати
	32	60 ати	8	4	7,6	97	9,9	25	96 ати
(2)	64	21 кгГ	1,3	10	10	13,85	13,8	5	17 кгГ
(1)	720	315 кгГ	3,0	10	2,25	16,2	6,52	4	296 кгГ

импульсного давления по опытам, d_i — диаметр пьезоэлектрического датчика давления, l — длина струй (толщина капли), V — объем ударяющей жидкости, P_r — средняя величина импульса давления по расчету по (1). Сравнение величин P_m и P_r показывает, что разница между ними лежит в пределах погрешностей опытов. Величина пика давления может вычисляться по формуле

$$P = kP_r,$$

где коэффициент k зависит от вида осциллографической кривой и лежит по данным работ (1, 2) и наших в пределах $k = 1,5 \div 3,0$.

Выводы

1. Механизм соударения жидкости и твердого тела определяется временем релаксации данной жидкости. Используя жидкости с различным временем релаксации, изменяя их температуру, добавляя полимеры, можно регулировать импульсное давление в желательном направлении.

2. Для расчета силы удара струй жидкости с использованием изложенной гипотезы необходимо проведение исследований времени релаксации жидкостей в условиях их движения.

3. Для повышения эффективности гидравлического оборудования, работающего ударом жидких струй, требуется создавать конструкции с прерывистым действием струй.

Институт проблем механики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
30 X 1969

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ F. P. Bowden, J. H. Brunton, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 263, № 1315 (1961).
² N. L. Hancock, J. H. Brunton, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 260, № 1110 (1966). ³ И. Г. Михайлов, В. А. Соловьев, Ю. П. Сырников, Основы молекулярной акустики, «Наука», 1964. ⁴ М. Корнфельд, Упругость и прочность жидкости, М., 1951. ⁵ F. P. Bowden, J. E. Field, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 282, № 1390 (1964).