

С. М. ИСААКЯН

О СВОБОДНОМ ПАДЕНИИ ШАРИКА В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ

1°. Свободным называется падение шарика в неограниченной среде жидкости. При $Re < 25$ оно совершается скольжением по вертикали, а при $Re > 25 - 50$ — и по извилистой траектории [1]. Нами в [2] показано, что траектория падения шарика извилиста и при малых числах Рейнольдса ($Re = 0,001$), извилистость траектории носит пространственный характер и геометрические параметры извилины соответствуют таковым для устойчивой вихревой системы. На основании этого сделан вывод, что извилистость траектории является механическим следствием гидродинамического сопротивления среды движению шарика и поэтому неотъемлемым свойством его падения.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментально-теоретических исследований, проведенных с целью проверки этого вывода. Вывод проверен многочисленными опытами, охватывающими широкую область числа Рейнольдса (до 6000), и с помощью теоретического решения Г. Ламба установлена зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса, моделирующая свободное падение шарика в вязкой среде.

2. Методика экспериментирования была та же, что и в [2]; в прозрачный цилиндрический сосуд (размеры которого варьировались в пределах: диаметр — от 80 до 150 мм, длина — от 1 до 6 м), заполненный подой или одно-глицериновым раствором разной концентрации, опускался стальной шарик диаметром $1 - 9$ мм и, освещая концентрированным светом, на темном экране фотографировалась его траектория вместе с линейным и временным масштабам. В качестве временного масштаба служил периодический обрыв следа шарика с помощью обтюратора. В зависимости от изменения температуры предварительно измерялись плотность и вязкость среды. Было произведено около 150 опытов (при необходимости с 10 — 15-кратным повторением). Произведены четыре серии опытов, отличающиеся концентрацией среды, размерами экспериментального сосуда, освещенностью среды и степенью увеличения объекта.

3°. Экспериментальные значения длины шага колебания траектории и скорости падения шарика определены при 15-кратном увеличении снимков. Частота колебания шарика определена как отношение средней скорости шарика к длине шага его траектории. При этом об-

наружены одинарная и двойная извилистости траектории падения (рис. 1).

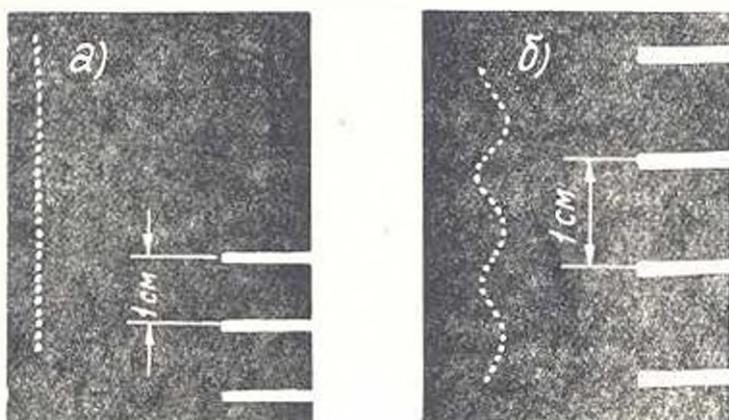


Рис. 1. Траектории падения шарика: а — с одинарной извилистостью; б — с двойной извилистостью.

В результате обработки выявлено: наличие колебания у всех шариков в рассмотренном диапазоне изменения числа Рейнольдса (0,001 — 6000); независимость частоты колебания от вязкости среды и от числа Рейнольдса; неоднозначность частоты при постоянстве остальных параметров. В качестве иллюстрации в табл. 1 приводятся данные, полученные для шарика с диаметром 0,555 см.

В табл. 1 N_n — экспериментальное значение частоты колебания в $\mu\text{с}$; $Re = vd$ — число Рейнольдса; d — диаметр шарика в см; v — скорость падения; ν — кинематическая вязкость.

4. Анализ экспериментально полученных данных произведен на основании теоретического решения задачи о колебании шара в упругой среде [3], при котором для частоты колебания шара получено выражение:

$$N_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8n(n+1)(n-1)(n-2)T}{[(n+1)\rho + n\rho_0]d^3}} \quad (1)$$

где T — поверхностное натяжение между шаром и средой; ρ и ρ_0 — соответственно плотности шара и среды; $n = 2, 3, 4, \dots$ — порядок колебания, причем, $n = 2$ соответствует основному колебанию.

По выражению (1) вычислены значения N_n и сопоставлены с экспериментальными значениями N_n . Поскольку в литературе отсутствуют значения поверхностного натяжения для твердого тела, находяще-

Таблица 1

N_n	Re	N_n	n
74,0	63,4	75,3	24
75,8	1000,0	75,3	24
80,0	4400,0	80,0	25
91,3	487,0	89,5	27
94,2	63,4	94,5	28
100,0	507,0	100,0	29
100,0	4400,0	100,0	29

гося в контакте с жидкостью, то оно нами определено косвенным путем. Для этого была построена зависимость числа Струхала $St = v \cdot Nd = l/d$ (где l — шаг колебания) от числа Рейнольдса, моделирующая колебательное падение шарика в вязкой среде для капли воды, падающей в воздухе ($T_{\text{возд.}} = 72,75 \text{ дин/см}$ при $l = 20 \text{ С}$ [4]). При этом принято $n = 2$, а скорость падения определена по Лященко [4].

Используя кривую $St = f(Re)$, изображенную на рис. 2, формулу (1) для частоты колебания стальных шариков в воде при $n = 2$ (экспериментальные условия) и кривую Лященко для определения скорости падения стальных шариков в воде, определено значение поверхностного натяжения между сталью и водой $T = 2,9 \text{ дин/см}$. По найденному значению T вычислены значения $St = f(Re)$ для стальных шариков, и, как видно из рис. 2, зависимости $St = f(Re)$ для стальных шариков,

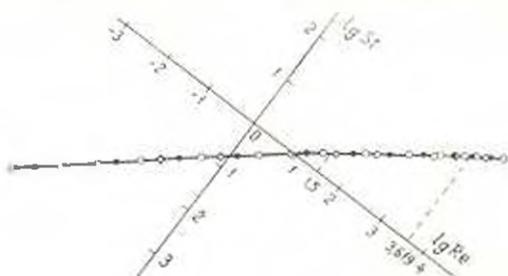


Рис. 2. График зависимости $St = f(Re)$: ● — для водяных шариков, падающих в воздухе; □ — для стальных шариков, падающих в воде; △ — для кварцевых шариков, падающих в воде.

падающих в воде, и водяных капель, падающих в воздухе, идентичны. В табл. 1 и на рис. 3 приведены значения частоты колебания шарика, полученные экспериментально и вычисленные по (1) при $T = 2,9 \text{ дин/см}$ и $n = 2 \div 35$. Как видно, экспериментальные и расчетные значения частот дают хорошую сходимость, тем самым подтверждается приемлемость принятого метода определения T , а также независимость частоты от Re .

На рис. 3 сплошными линиями изображена зависимость $N_s = f(d)$ по формуле (1) для стальных шариков, падающих в воде (n — в качестве параметра), точками обозначены экспериментальные значения частоты колебания шариков. Как видно из рисунка, экспериментальные точки в основном совпадают с теоретической кривой. Причем, лучшую сходимость дают значения N_s , полученные при чистой воде; при водно-глицериновых растворах наблюдается некоторое снижение частоты — это результат того, что поверхностное натяжение для глицерина (до 66 дин/см) несколько меньше, чем для воды.

Косвенная проверка полученного значения T для стали с водой, произведенная при колебаниях цилиндрического столба жидкости, находящейся в стальной трубе, также дала убедительные результаты [5].

5. Кривая зависимости $St = f(Re)$, приведенная на рис. 2, аппроксимируется следующими выражениями *:

$$\begin{aligned} \text{а) при } Re = 0 \div 32 & \quad St = 0,1585 Re^{0,8219}; \\ \text{б) при } Re = 32 \div 4000 & \quad St = 0,2331 Re^{0,7103}; \\ \text{в) при } Re = 4000 \div 10000 & \quad St = 0,4797 Re^{0,6237}; \end{aligned} \quad (2)$$

откуда для скорости падения шарика получается:

$$\begin{aligned} \text{а) } v &= 0,002758 \left(\frac{T}{3\gamma + 2\rho_0} \right)^{2,5075} d^{0,8075} \nu^{-1,613}; \\ \text{б) } v &= 0,101766 \left(\frac{T}{3\gamma + 2\rho_0} \right)^{1,7225} d^{0,7225} \nu^{-2,443}; \\ \text{в) } v &= 1,1676 \left(\frac{T}{3\gamma + 2\rho_0} \right)^{1,3287} d^{0,3287} \nu^{-1,8575}, \end{aligned} \quad (3)$$

при тех же пределах применимости. Заметим, что в (3) учитывается влияние поверхностного натяжения между шариком и средой на ско-

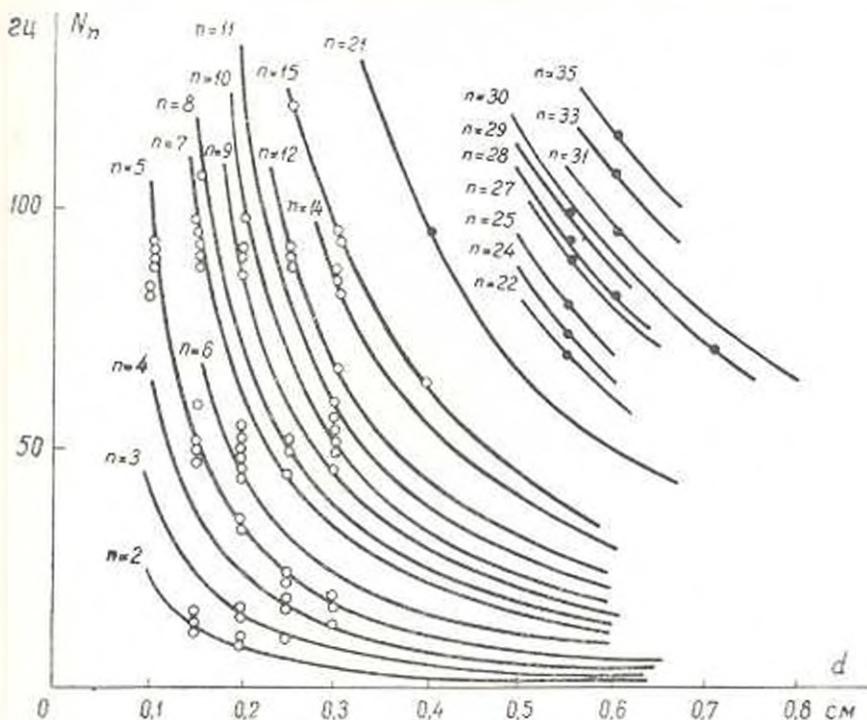


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и вычисленных по формуле (1) значений частот колеблющейся шариком. \circ — водно-глицериновые растворы; \bullet — чистая вода.

* В (2) пределы применимости показаны округленно. На рис. 2 указаны их точные значения — 31,62 и 4159, соответствующие минимуму среднеквадратичных отклонений от кривой.

рость его падения.

Небезынтересно отметить, что при подстановке в выражение числа Струхала $St = v/Nd$ значение N по формуле (1) оно превращается в число Вебера в степени 0,5.

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В диапазоне изменения числа Рейнольдса $Re = 0,001 - 6000$ свободное падение шарика в вязкой среде носит колебательный характер.

2. Падение шарика в жидкости описывается выражениями (2), учитывающими силу сцепления между шариком и средой (поверхностное натяжение).

3. Частота колебания предопределяется силой сцепления между шариком и средой, плотностью шарика и среды, диаметром шарика. Она не зависит от вязкости среды и скорости падения шарика.

Институт органической химии
АН Арм. ССР

Поступило 6.VI.1969

Ս. Մ. ԻՍԱԿՅԱՆ

ԽԱՇՈՒՅԻԿ ԵՆԶԱՎԱՅՐՈՒՄ ԳՆՊԻՆ ԱԶԱՏ ԱՆԿՈՒՆ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ

Ս. մ փ ո փ ո լ մ

Ցույց է տրված, որ մածուցիկ միջավայրում զնդիկի ազատ անկումը տեղի է ունենում ոլորապտույտ հետազոտվ, որը հետևանք է միջավայրի զիտադրույթան: Գնդիկի ոլորապտույթաների հաճախությունը համընկնում է նրա ազատ տատանումների հաճախության հետ և ունի (1) բանաձևով բնորոշող բաղաձայնություն: Անկման հետազոտի բնութագիրը ներկայացված է Ատրուխալի թվով, որը կախման մեջ է գրված Ռեյնոլդսի թվից, և բանակորեն բնորոշվում է նկ. 2-ում բերված կորով կամ (2) բանաձևերով: Այն ընդունելի է տարրերի հեղուկների մեջ տարրերի նյութերից պատրաստված զնդիկների անկման համար:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Биркгоф Г., Сарактонелло Э. Струи, следы и каверны. Изд. ИЛ, 1964.
2. Исаакян С. М., Гаспарян А. М. О механизме взаимодействия твердых тел с жидкостью. Сообщение 2. «Известия АН Арм. ССР (серия Т.Н.)», т. XVII, № 6, 1965.
3. Ламб Г. Гидродинамика, ОГИЗ, 1947.
4. Справочник химика, т. I, 1963, стр. 1011; т. III, стр. 799.
5. Исаакян С. М. «Доклады АН Арм. ССР», т. I, № 1, 1970.