

УДК 534.88

ГИДРОДИНАМИКА

С. М. Исаакян

О некоторых поверхностных эффектах в гидродинамике

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 21/XII 1971)

Кинофиксация траектории падения шарика по оси цилиндрической трубы, заполненной вязкой жидкостью показала ее извилистый характер. Пространственная киносъемка этой траектории (¹) при падении шарика по оси призматического сосуда с прозрачными стенками показала ее пространственный характер (рис. 1).

Было показано, что извилистость траектории падения шарика, в противовес существующему мнению (²), имеет место и при глубоких ламинарных режимах ($Re = 0,001$) падения шарика (³) (рис. 2).

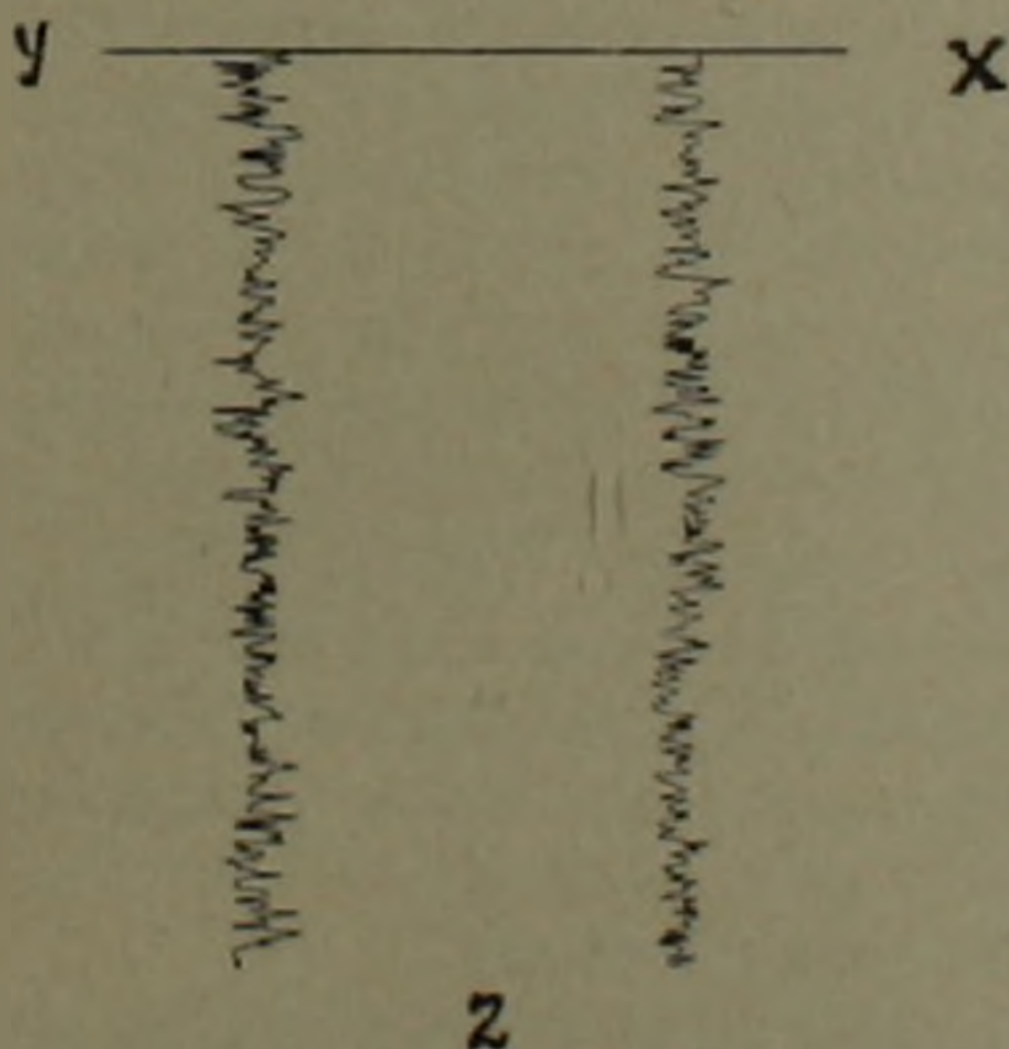


Рис. 1. Траектория падения шарика в вязкой среде в двух ортогональных проекциях, зафиксированная пространственным кино.

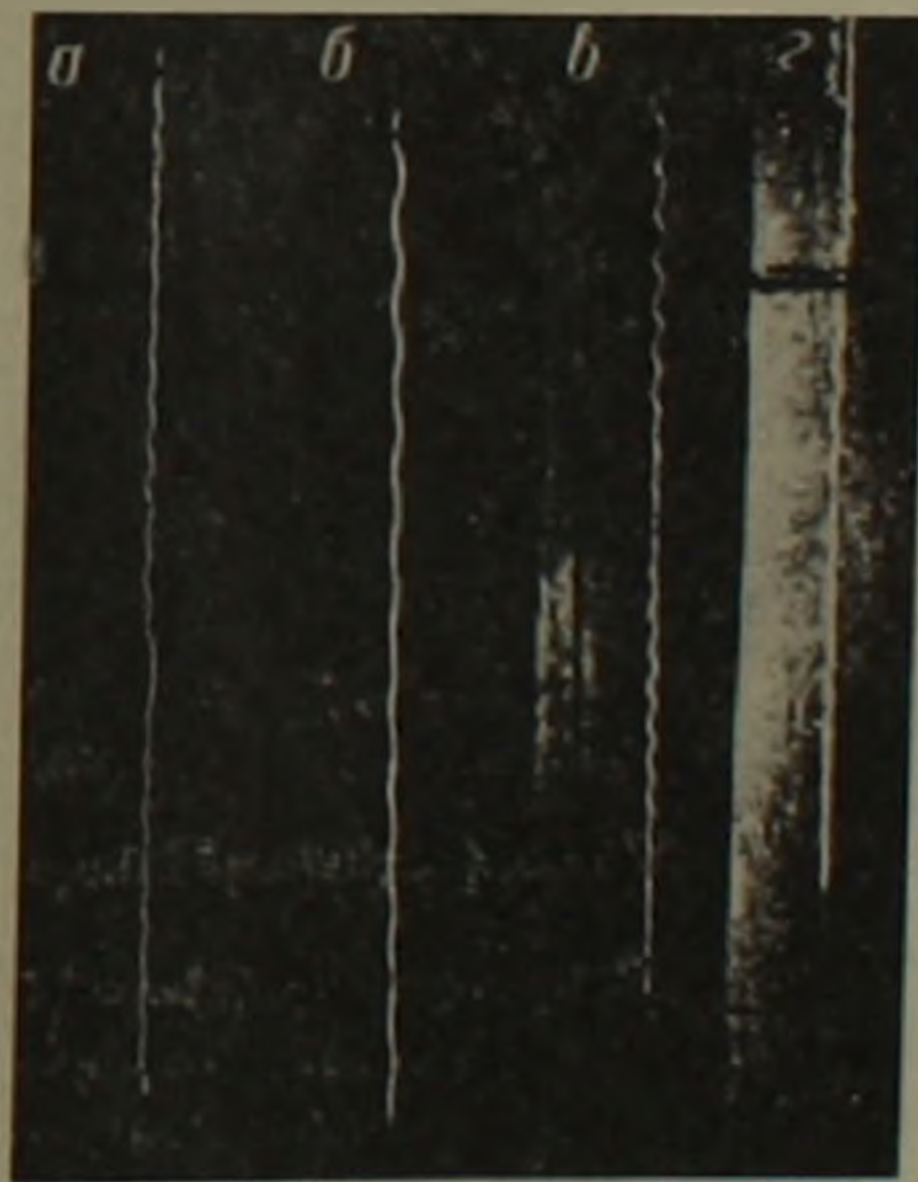
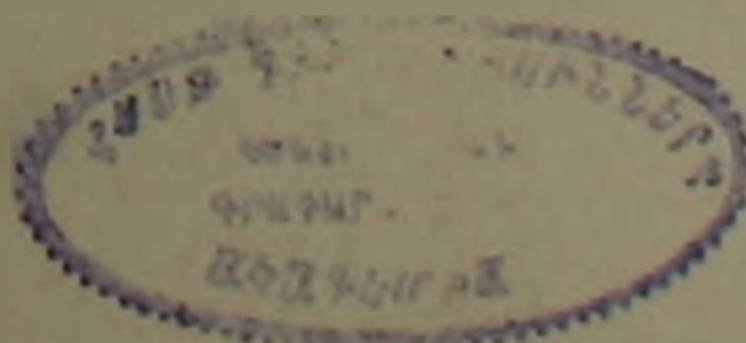


Рис. 2. Фотозапись траектории падения шарика в охлажденном глицерине:
а) $d = 2 \text{ мм}$, $Re = 0,011$; б) $d = 2 \text{ мм}$, $Re = 0,021$;
в) $d = 3,15 \text{ мм}$, $Re = 0,039$; г) $d = 3,15 \text{ мм}$, $Re = 0,08$.

С помощью фотофиксации около 1600 траекторий падения стальных шариков ($d = 2—8,8 \text{ мм}$) по оси цилиндрических и призматичес-



ких сосудов с поперечными размерами 80—150 мм и длиной 0,7—7,0 м, заполненных водноглицериновыми растворами разной концентрации (0—100 %), при изменении температуры среды $t = 10—40^\circ\text{C}$ было установлено, что независимо от числа Рейнольдса ($Re = 0,001—6600$) падение шарика осуществляется преимущественно извилистой траекторией (¹).

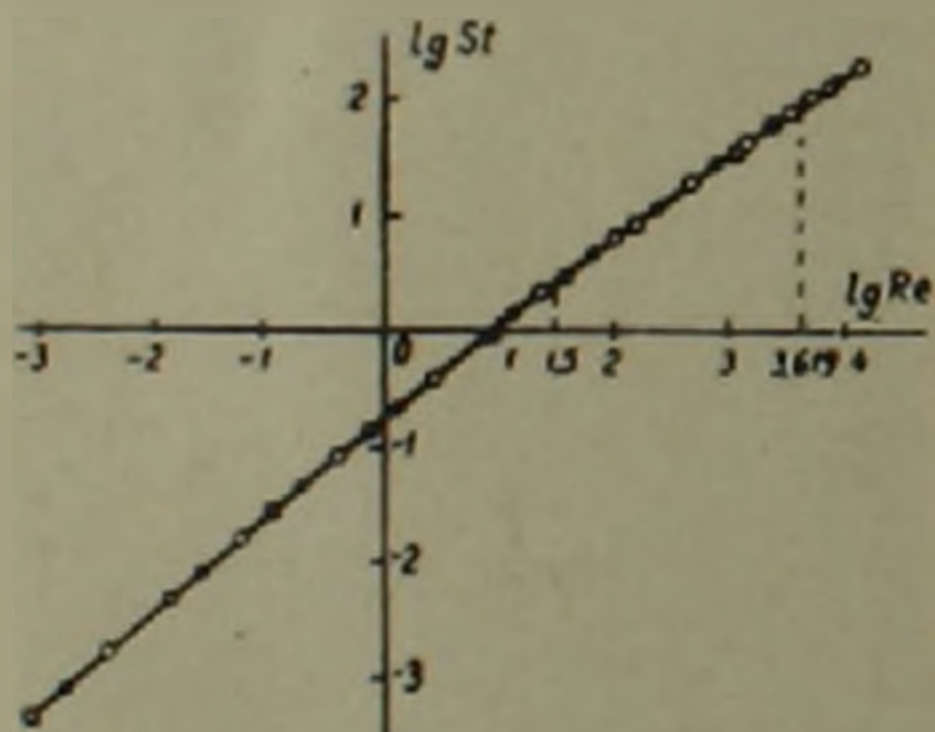
Сопоставление полученного экспериментального материала о колебании твердых шаров в жидкости (¹) с результатом, полученным Рэлеем (¹) для капли жидкости, колеблющейся в газообразной среде привело к выводу о качественной идентичности рассматриваемых явлений.

Имея в виду, что, согласно Рэлею колебание капли жидкости в газе обуславливается колебанием граничной молекулярной пленки с натяжением T , нами была выдвинута гипотеза о существовании аналогичной пленки и на поверхности контакта жидкости с твердым шаром.

Для количественной проверки вышеуказанной гипотезы необходимы были данные о молекулярном натяжении на контакте жидких и твердых тел. С целью его косвенной оценки была использована теория гидродинамического подобия, с помощью которой была установлена полная моделируемость колебательного падения шарообразных тел в вязкой среде критериальной зависимостью числа Струхала, $St =$

$\frac{v}{Nr}$, от числа Рейнольдса, $Re = \frac{vr}{\nu}$. Она с большой точностью была

построена для капли воды, падающей в воздухе (рис. 3), где v —ско-



рость падения капли, определенная по кривой Лященко (⁶), r —радиус шарика, ν —кинематический коэффициент вязкости среды; N —частота основного колебания ($n=2$) шарообразной капли воды в воздухе, определяемая формулой Рэлея:

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

Здесь T —поверхностное натяжение; ρ_0 и ρ —плотности материалов шарика и среды; $n=2, 3, 4, \dots$ —порядок гармоник.

Рис. 3. График зависимости $St = f(Re)$ для: нисе; ρ_0 и ρ —плотности материалов шарика и среды; $n=2, 3, 4, \dots$ —порядок гармоник.
 ●—возяных шариков, падающих в воздухе;
 ○—стальных шариков, падающих в воде;
 □—кварцевых шариков, падающих в воде

Путем исключения скорости падения шарика v по формуле Стокса (в области ее применимости) из зависимости $St = f(Re)$ было определено молекулярное натяжение на контакте материалов шарика и среды в виде зависимости

$$T = 28,2 (3\rho_0 + 2\rho) \sqrt{\frac{\nu^3(\rho_0 - \rho)}{\rho}}. \quad (2)$$

Приложение формул (1) и (2) к построению кривой $St=f(Re)$ для стальных шариков, падающих в воде и для кварцевых шариков, падающих в воде привело к полному слиянию этих кривых с кривой, построенной для капли воды в воздухе.

Значение T для стальных шариков, находящихся в воде было проверено с помощью сопоставления вышеуказанных экспериментальных частот колебания с их теоретическими значениями, вычисленными по формуле Рэлея при $n=2-35$ (рис. 4).

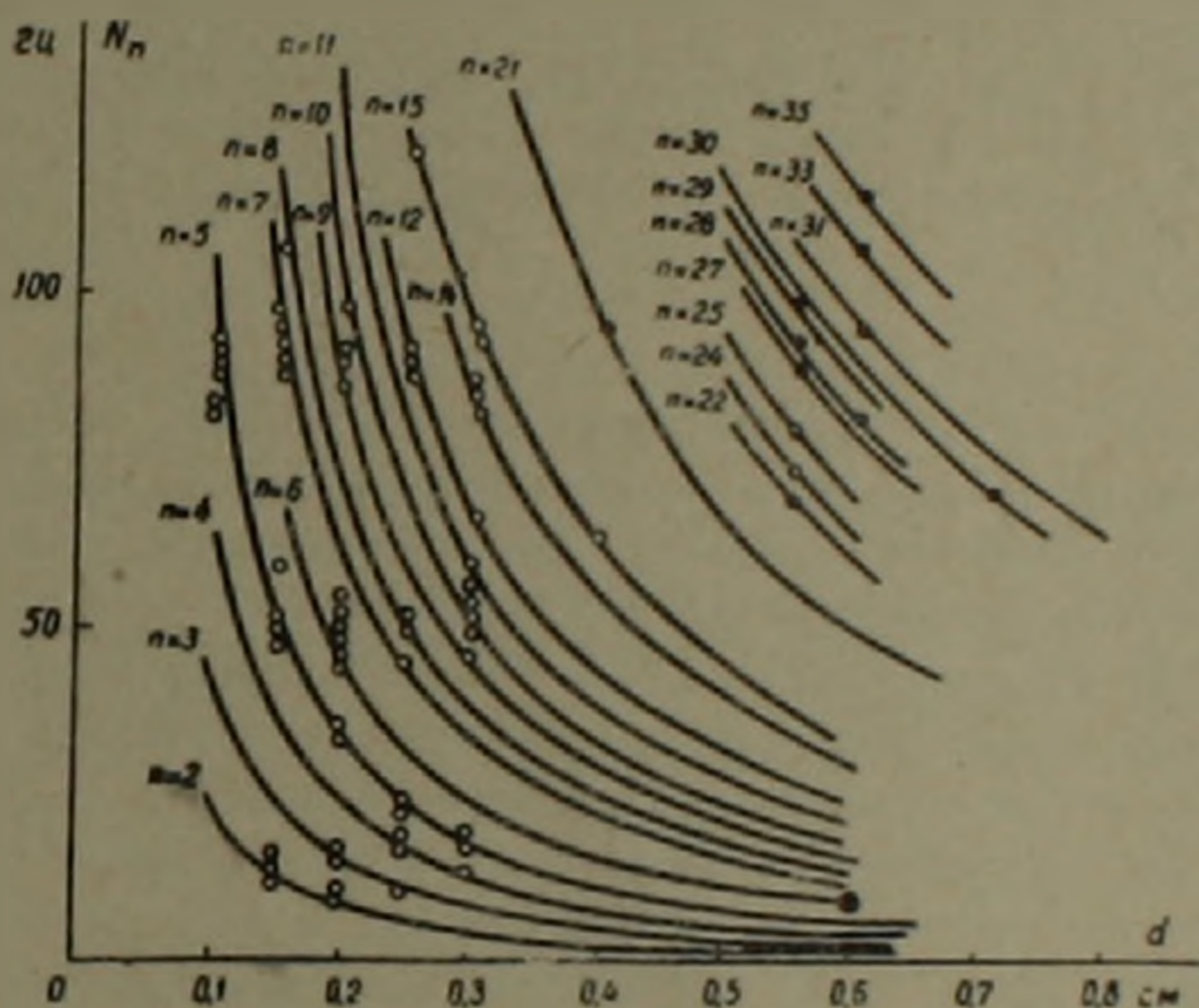


Рис. 4. График сопоставления теоретических частот колебания стальных шариков в воде при $n=2-35$ с их экспериментальными значениями

Рис. 4 показывает вполне удовлетворительное согласие между ними. Знаменательно, что минимальность частоты колебания, соответствующей $n=2$ не нарушена ни одной экспериментальной точкой.

Натяжение T , полученное для стальных шариков, находящихся в воде было применено к вычислению частот колебания воды в стальной цилиндрической трубе по формуле Рэлея

$$N_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n(n^2-1)T}{\rho R^3}}, \quad (3)$$

полученной для колебания цилиндрического ствола жидкости, находящегося в газе, где R — радиус поперечного сечения цилиндра.

Частоты, вычисленные по формуле (3) для труб с диаметрами: 0,6; 0,69; 1,21; 1,8 см при $n=2, 3, 4 \dots$ вместе с зафиксированными на экспериментах (7) частотами колебания давления потока воды на стенках стальных цилиндрических труб указанных диаметров приведены в табл. 1.

Таблица 1

$D, \text{ см}$	0.6		0.69		1.21		1.80	
	теоретическая	экспериментальная	теоретическая	экспериментальная	теоретическая	экспериментальная	теоретическая	экспериментальная
N_2	5.30	5.34	3.25	3.18	1.42	1.56	0.78	0.73
N_3	10.55	10.30	6.46	5.67	2.83	2.32	1.55	1.64
N_4	16.70	16.80	10.20	10.15	4.47	4.66	2.46	2.47
N_5	23.60	24.00	14.45	13.90	6.35	6.40	3.48	—
N_6	31.20	—	19.20	19.00	8.40	8.44	4.60	4.85
N_7	39.50	39.50	24.20	24.20	10.60	10.30	5.82	6.00
N_8	48.30	48.30	29.60	29.40	13.00	13.10	7.13	—
N_9	57.80	—	35.40	—	15.50	15.50	8.50	—
N_{10}	67.50	—	41.41	—	18.10	17.60	9.55	10.30
N_{11}	—	—	—	—	21.00	21.20	11.50	11.60
N_{12}	—	—	—	—	24.00	24.20	13.20	13.10

Как видно из таблицы, согласие между опытом и формулой (3) вполне удовлетворительное. При этом, минимальные значения частот, полученные однозначно, при $n=2$, для всех четырех труб совпадают с минимальными значениями опытных частот.

Значение поверхностного натяжения на контакте кварцевых шариков с водой было проверено с помощью резонансного выделения из полидисперсного песка частиц расчетного диаметра. Знаменательно, что мощность импульсов вибратора оказалась прямо пропорциональной секунднему количеству выделенных частиц расчетного диаметра. При удалении же со смеси всех частиц расчетного диаметра оказалось, что вибрация не действует на процесс сепарации.

Таким образом, молекулярная пленка с натяжением T на поверхности контакта твердого шарика с жидкой средой и потока жидкости в твердых цилиндрических стенках вместе с колеблющимися массами определяют частоты колебания шарика в жидкости и жидкости в трубе.

Институт физических исследований
Академии наук Армянской ССР

В. В. ХУАՀԱՆՅԱՆ

Հիդրոդինամիկայում ուղղ մակերևութային ազդեցությունների մասին

Ի տարբերություն գոյություն ունեցող կարծիքի (¹) հեղինակի փորձերով ցույց է տրված, որ անկախ շարժման ուժից ($Re=0.001-6600$) (²) կարծր գնդիկների անկումը հեղուկ միջավայրում տեղի է ունենում ղերազանցապես պտուտակային հետագծով (նկ. նկ. 1, 2):

Ցույց է տրված նաև (¹), որ պտուտակազծի երկրաչափական բնութագիրը համապատասխանում է կայուն մրրկային սխեմաների բնութագրին, որտեղից բխեցրած է դիտվող տատանումների մրրկային ծագումը: Ցույց է տրված

հեղուկ միջավայրում կարծր գնդիկի և կարծր պատերով խողովակում գլանա-
կան շիթի տատանման հաճախականությունների նմանությունը օդում՝ կաթիլի
և շիթի տատանման հաճախականություններին, որոնք բնորոշվում են Ռեյնոլդսի
(1) և (3) բանաձևերով:

Այս թեզի թանախական ստուգման նպատակով օգտագործելով հիդրոդինա-
միկական նմանության տեսությունը ստացված է $St = f(Re)$ կրիտերիալ
առնչությունը, որտեղից որոշված է հեղուկի մակերևութային լարվածությունը
կարծր պատերի վրա ((2) բանաձև), որը ճիշտ է նաև հեղուկ-գազ գուգակցու-
թյան համար:

Հեղինակի կողմից արձանագրված հաճախականությունները հեղուկի մեջ
գնդիկի և խողովակում գլանական շիթի տատանումների դեպքում բավարար
կերպով համընկնում են Ռեյնոլդսի բանաձևերով հաշված նրանց արժեքների հետ.
որի մասին են վկայում նկ. 4-ն ու տեքստում բերած աղյուսակը:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ С. М. Исаакян, «Известия АН Арм. ССР», сер. физ. мат. естеств. и техн. н., т. 8, № 2, (1955).
- ² Г. Биркгоф, Э. Саронтоелю, Струн, следы и каверны, 1961.
- ³ С. М. Исаакян, А. М. Гаспарян, «Известия АН Арм. ССР», сер. техн. н., т. 18, № 6, (1965).
- ⁴ С. М. Исаакян, «Известия АН Арм. ССР», сер. техн. н., т. 23, № 4, (1970).
- ⁵ Дж. Стретт (Лорд Рэлеи), Теория звука, т. 2, стр. 363, (1944).
- ⁶ Справочник химика, т. 1, стр. 1011, (1963).
- ⁷ С. М. Исаакян, ДАН Арм. ССР, т. 50, № 1, (1970).