

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. Гаспарян и Н. С. Икарян

О стесненном падении бесформенных частиц

(Представлено Н. Х. Арутюняном 20.VIII.1957)

Многочисленные исследования, посвященные стесненному падению частиц в среде, имеют конечную задачу—найти закономерности стесненного падения полидисперсных бесформенных (неправильной формы) частиц, так как в технике в основном процессы ведут с помолами различных веществ.

Первая часть задачи—стесненное падение монодисперсных сферических частиц—разрешена приближенно. Общепризнанным пока является уравнение типа (1):

$$C = K C_0 m^n. \quad (1)$$

При удачно определенных значениях коэффициента K и степени n это уравнение дает значения скорости C , отличающиеся от опытных данных на $\pm 10\%$, при величине пористости m от 0,5 до 0,90. Показано (2), что при более высоких значениях m уравнение (1) становится неприемлемым.

Второй частью задачи является стесненное падение монодисперсных несферических или бесформенных частиц, частиц помола. Здесь имеются осложняющие задачу обстоятельства.

Частицы помола данного вещества, имея в общем схожие конфигурации, все же сильно отличаются друг от друга по длине, ширине и по толщине. Значительна также разница в массах отдельных частиц той же узкой ситовой фракции. Поэтому получение или выделение поистине монодисперсных частиц помола невозможно. Монодисперсность в этом случае является условной. Кроме того, общая конфигурация частиц различных материалов резко может отличаться, в зависимости от их минералогического и кристаллического состава. На рис. 1, 2 и 3 приведены фотографии частиц буланжерита, галенита и стекла фракции — 50+70 меш.

В литературе принято понятие „сферичность частицы“ или „симплекс формы“— Ψ , означающее отношение поверхности равновеликого (по объему) шара к поверхности несферической частицы.

Н. И. Смирнов и Ли Дэ Эп ⁽³⁾, Л. Н. Еркова и Н. И. Смирнов ⁽⁴⁾ пришли к уравнениям для несферичных частиц, отличающихся от

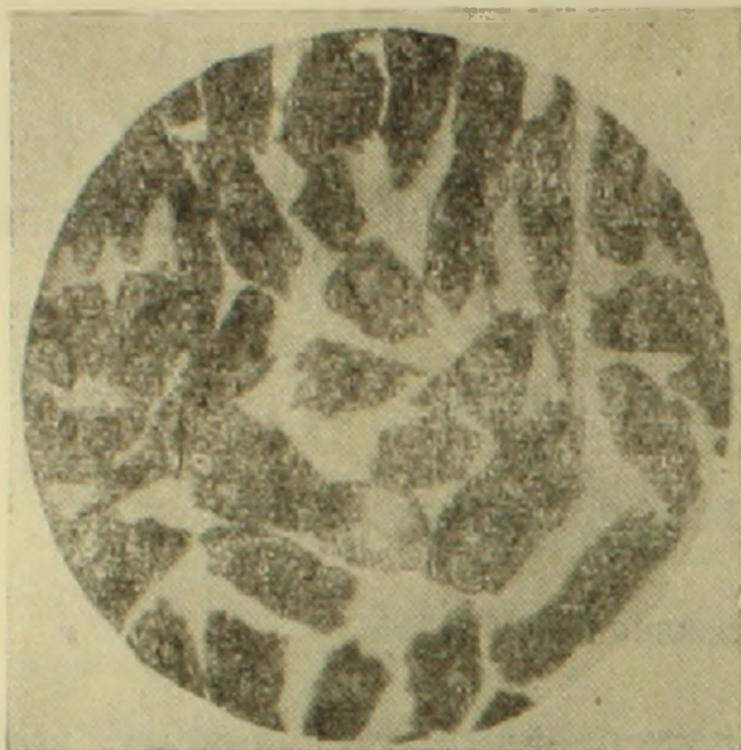


Рис. 1. Булджерит.

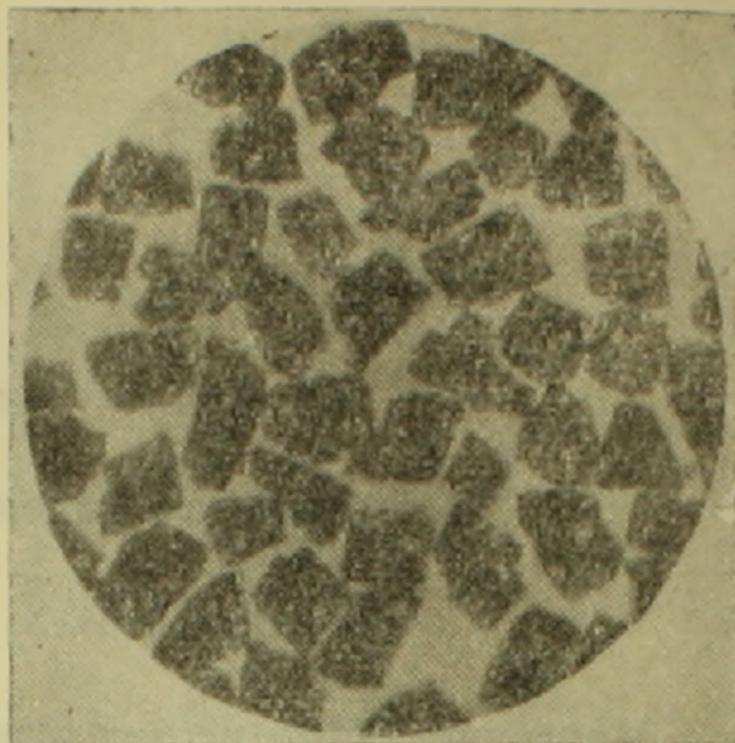


Рис. 2. Галенит.

уравнений для сферических частиц постоянным коэффициентом Ψ^x . Степень x имеет значения от 1 до 2, в зависимости от режима движения.

Люис и Боверман ⁽⁵⁾ также считают, что уравнение для несферических частиц должно отличаться от такового для сферических частиц постоянным коэффициентом Ψ^x , но конкретных уравнений не приводят.

Из утверждений указанных авторов следует:

$$U : C = \Psi^x = \text{const.} \quad (2)$$

Это означает, что соотношение скорости стесненного падения несферических частиц U к такой же скорости соответствующих сферических частиц C является постоянным и не зависит от пористости взвеси.

Наше экспериментальное исследование для помолов не согласуется с уравнением (2).

Наше экспериментальное исследование для помолов не согласуется с уравнением (2).

Таблица 1

П о м о л		Диаметр получен. шариков, в микронах	Опытные значения $U : C$			
фракции меша	средн. раз- мер сит в микр.		$m=0,9$	$m=0,8$	$m=0,7$	$m=0,6$
—140 + 200	89,5	91	0,792	0,554	0,384	0,250
—100 + 140	127	126	0,815	0,627	0,500	0,290
—70 + 100	179,5	188	0,800	0,598	0,433	0,265

Из молотого кускового стекла были выделены 3 ситовые фракции, и часть каждой из фракций была превращена в шарики (*). Затем методом взвешивания (1) были определены значения U и соответствующих C . В табл. 1 даны характеристика помолов стекла, полученных из этих помолов стеклянных шариков и опытные значения отношения $U:C$.

Из табл. 1 видно, что соотношение $U:C$ не является постоянной величиной, и в зависимости от пористости m меняется в широких пределах.

Очевидно, что воззрение, согласно которому замедление скорости падения бесформенной частицы объясняется именно ее более развитой поверхностью, не оправдано.

Следует отметить, что Н. И. Смирнов, Ли Дэ Эп и Л. Н. Еркова свои опыты вели с частицами правильной формы — кубиками и цилиндрами. Из частиц неправильной формы они экспериментировали только с кварцевым песком, частицы которого достаточно округлены и на них трудно обнаружить отклонения от уравнения (2).

В поисках иного объяснения замедленности падения бесформенных частиц мы пришли к выводу, что следует руководствоваться следующим известным представлением (7): частица при движении в вязкой среде обволакивается ею, углубления и неровности на поверхности частицы заполняются практически неподвижной (относительно частицы) средой, и бесформенная частица вместе с приставшей средой образует более обтекаемое, по форме близкое к сфере тело; назовем его *псевдошаром* (рис. 4). Принимаем, что в процессе движения псевдошар себя ведет как целое, самостоятельное тело. Пусть плотности частиц, среды и псевдошара будут ρ , ρ_1 и ρ_2 . Диаметры равновеликого шарика и псевдошара — d и d_2 . Масса среды в псевдошаре будет:

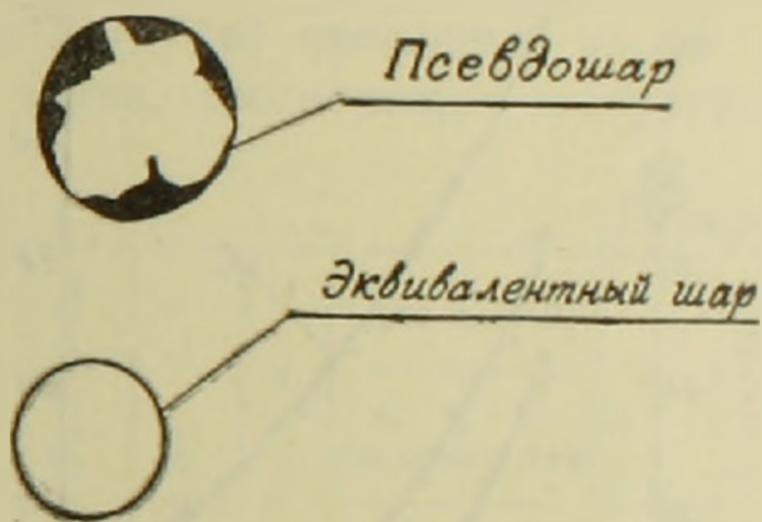


Рис. 4.

$$\frac{\pi}{6} \left(d_2^3 - d^3 \right) \rho_1 = \frac{\pi}{6} \left(d_2^3 \rho_2 - d^3 \rho \right). \quad (3)$$

Отношение объема псевдошара к объему эквивалентного шарика обозначим через α :

$$d_2^3 = \alpha d^3. \quad (4)$$

Из (3) и (4) получается:

$$\rho_2 = \frac{\rho + (\alpha - 1) \rho_1}{\alpha}. \quad (5)$$

Выражение Лященко для псевдошара будет:

$$Re^2 \Psi = \frac{\pi d_2^3 \rho_1 (\rho_2 - \rho_1) g}{6 \mu^2}$$

Подставляя сюда значения d_2 и ρ_2 , получаем:

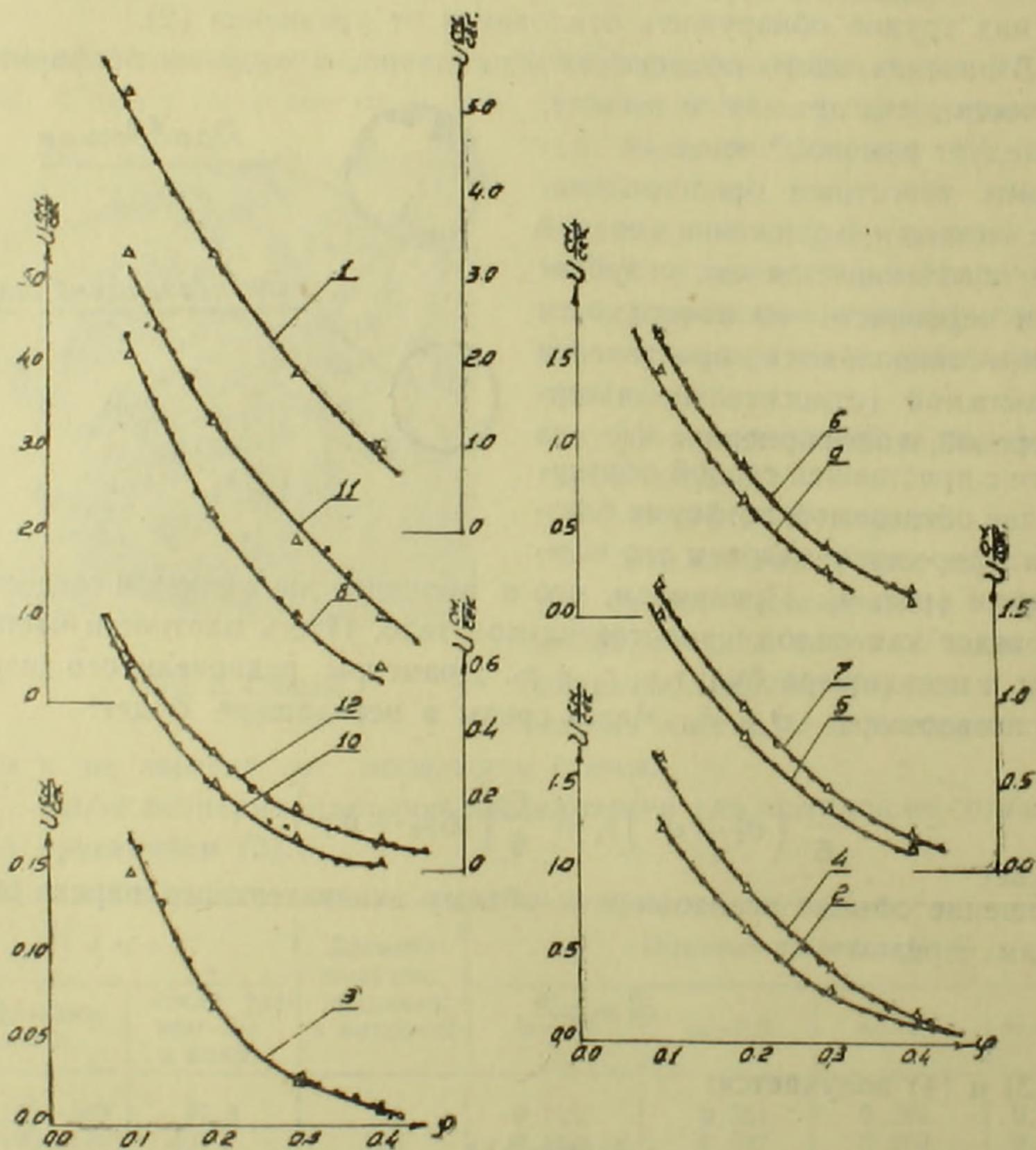
$$Re^2 \Psi = \frac{\pi d^3 \rho_2 (\rho - \rho_1) g}{6 \mu^2}$$

Это есть выражение Лященко для эквивалентного шарика. Следовательно, числа Рейнольдса для свободно падающих равновеликого шарика (скорость C_0) и псевдошара (скорость U_0) равны:

$$\frac{C_0 d \rho_1}{\mu} = \frac{U_0 d_2 \rho_1}{\mu} \quad (6)$$

или

$$U_0 = C_0 \frac{d}{d_2} = \frac{C_0}{\sqrt[3]{a}} \quad (7)$$



Если истинная объемная концентрация бесформенных частиц во взвеси равняется φ , то объемная концентрация псевдошаров будет $\varphi_2 = \alpha\varphi = \alpha(1 - m)$. Уравнение (1) применительно к псевдошарам (их скорость стесненного падения U , а пористость m_2) приведет к:

$$U = K U_0 m_2^n = K U_0 (1 - \varphi_2)^n = \frac{K C_0}{\sqrt[n]{\alpha}} (1 - \alpha\varphi)^n \quad (8)$$

или
$$U = \frac{K C_0}{\sqrt[n]{\alpha}} [1 - \alpha(1 - m)]^n. \quad (8a)$$

Делением (8) на (1) получается

$$U : C = \frac{1}{\sqrt[n]{\alpha}} \left(\frac{1 - \alpha\varphi}{1 - \varphi} \right)^n, \quad (9)$$

α и n постоянные и α больше единицы. Нетрудно заметить, что в (9) возрастание φ приводит к уменьшению отношения $U : C$, т. е. оно качественно отражает опытные данные табл. 1.

Для выяснения степени количественной точности полученных уравнений измерялись скорости U стесненного падения помолов ряда веществ. Экспериментальные кривые $U = f(\varphi)$ приведены на рис. 5. Там же в треугольниках отмечены точки, рассчитанные по уравнению (8).

Таблица 2

Вещество частицы				C_0 с.м/сек.	Re	n	Для $\varphi=0.2$		α	псевдо-шары микр.
название	ρ	фракция меш.	d микр.				C с.м/сек	U с.м/сек		
Стекло	2,50	-20+30	742	10,49	61,2	3,26	4,06	3,29	1,185	785
"	2,50	-50+70	236	3,01	7,1	3,99	0,99	0,67	1,293	257
"	2,50	-200+270	61	0,30	0,19	5,10	0,099	0,072	1,213	65
Кварцит	2,69	-50+70	263	3,84	10,1	3,87	1,29	0,92	1,267	285
Известняк	2,70	-50+70	253	3,65	9,2	3,90	1,22	0,80	1,326	278
Базальт	3,01	-50+70	243	3,95	9,6	3,88	1,33	0,90	1,298	266
Неф. слениты	2,67	-50+70	255	3,66	9,3	3,89	1,23	0,97	1,180	270
Буланжерит	6,17	-50+70	288	9,70	27,8	3,52	3,53	2,22	1,344	318
"	6,17	-100+140	141	3,90	5,5	4,07	1,26	0,69	1,442	160
"	6,22	-200+270	82	1,60	1,32	4,56	0,46	0,26	1,392	92
Галенит	7,43	-50+70	272	10,6	28,7	3,51	3,87	3,32	1,128	283
Кварц. песок	2,63	-100+140	133	1,29	1,72	4,67	0,38	0,35	1,060	136

Примечание. 1. Плотности ρ определены нами. 2. Диаметры частиц d определены путем взвешивания отсчитанного количества частиц. Приведенные цифры являются диаметрами эквивалентных шариков. 3. Скорость C_0 свободного падения эквивалентных шариков определена по Лященко. 4. Скорости стесненного падения сфер C определены по ур. (10-12), а скорости стесненного падения помолов U взяты из экспериментальных кривых рис. 5. 5. Значения α определены из ур. (9). 6. При определении C и U исходили из $\varphi=0,2$ ввиду того, что при этом значении φ получаются наиболее достоверные опытные данные. 7. Средой для опытов являлась вода.

В нашей лаборатории выполнены многочисленные опыты по определению скорости C стесненного падения строго сферических и монодисперсных (или почти монодисперсных) частиц различных материа-

Նշելով այն պատկերացումից, որ մածուցիկ միջավայրում շարժվող տվյալ մասնիկը շրջապատվում է միջավայրի անշարժ շերտով (նկ. 4) և այսպիսով գոյանում է զնդածին մոտ պսևդոգունդ, դուրս է բերված (8a) հավասարումը, որտեղ C_0 — էկվիվալենտ զնդիկի աղատ անկման արագութունն է, α — պսևդոգունդի և էկվիվալենտ զնդի ծավալների հարաբերությունն է, իսկ k և n (1) հավասարման համապատասխան գործակիցն ու աստիճանացուն են:

Հալ. (9) տալիս է U -ի և C -ի հարաբերությունը: Այստեղ φ -ն կախվածքի խտությունն է, հավասար (1-m)-ի:

(10), (11) և (12) բանաձևերը վերաբերվում են զնդածին մասնիկների կաշկանդված անկմանը. նրանց նշտությունը մոտ $\pm 10\%$ է: Այդ հավասարումների օգնությամբ, ելնելով № 5 զժազրում բերված փորձնական տվյալներից, (9) հավասարումով որոշվել է α -ի արժեքը, երբ $\varphi=0,2$: Ընդունելով, որ α -ն հաստատուն է տվյալ աղացվածքի համար, (8) հավասարումով հաշված են U -ի արժեքները այլ φ -երի համար, որոնք № 5 զժազրի վրա նշված են եռանկյունիներով: Փորձնական կորերի և հաշված կետերի բավարար համընկնումը ցույց է տալիս պսևդոգունդի հիպոթեզի ընդունելի լինելը:

№ 2 աղյուսակում բերված են մի շարք տվյալներ, որոնք վերաբերվում են զժ. 5-ի կորերին:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ А. М. Гаспарян и А. А. Замянян, ДАН АрмССР, т. XXV, № 4, 213—218 (1957). ² А. М. Гаспарян и А. А. Замянян, ДАН АрмССР, т. XXVI, № 1 (1958). ³ Н. И. Смирнов и Ли Дэ Эл, ЖПХ, № 4. 1 (1951). ⁴ Л. Н. Еркюва и Н. И. Смирнов, ЖПХ, XXI, 1947 (1956). ⁵ Е. В. Люис и Е. В. Боверман, Chem. Eng. Progr., 48, № 12, 603—10 (1952). ⁶ А. М. Гаспарян и А. А. Замянян, ДАН АрмССР, XXIII, 67 (1956). ⁷ Л. С. Лейбензон, Д. С. Билькар, П. П. Шумилов и В. С. Яблонский, Гидравлика, 305 (1934).