

И. В. Егiazаров

К определению начальной влекущей силы транспорта наносов. Уточнение уравнений расхода влекомых потоком наносов

Лобовое воздействие потока на обтекаемое зерно наноса определяется силой

$$F = C_x \rho d^2 \frac{v^2}{2},$$

где C_x — безразмерный коэффициент лобового сопротивления, зависящий от формы и условий обтекания зерна.

Сила, необходимая для влечения потоком зерна, связана с весом зерна в потоке и равна

$$F = f'(\gamma_n - \gamma) d^3,$$

где f' — безразмерный коэффициент трения, зависящий от относительной шероховатости русла.

Начальное критическое состояние получается при равенстве этих двух сил, т. е. при:

$$C_x \rho d^2 \frac{v^2}{2} = f'(\gamma_n - \gamma) d^3,$$

и т. к.

$$v_0^2 = C^2 R_0 i,$$

то

$$C_x C^2 \frac{\rho}{2} R_0 i = f'(\gamma_n - \gamma) d$$

$$\text{или начальная влекущая сила: } S_0 = \gamma R_0 i = 2g \frac{f'}{C^2 C_x} (\gamma_n - \gamma) d. \quad (1)$$

$$\text{Обозначая } f = 2g \frac{f'}{C^2 C_x} = \frac{f'}{C_x}, \quad (2)$$

$$\text{напишем } S_0 = f(\gamma_n - \gamma) d. \quad (3)$$

Т. к. $f = \frac{S_0}{(\gamma_n - \gamma) d}$, то следовательно f — безразмерно.

$$\text{Т. к. } C_x = \varphi(Re_d) \quad \text{и} \quad C = \varphi\left(\frac{R}{d}, \frac{C}{Re_R}\right),$$

то следовательно $f = \varphi\left(C_x, \frac{R}{d}, \frac{C}{Re_R}\right)$, где

$$Re_R = \frac{v_0 R}{\nu} \quad \text{и} \quad Re_d = \frac{v_0 d}{\nu}.$$

С другой стороны, Шильде [8] показал, что $f = \phi(Re_{*d}) = \varphi\left(\frac{d}{\delta}\right)$,

где $Re_{*d} = \frac{v_* d}{\nu}$; δ — толщина придонного ламинарного слоя.

Следовательно,

$$\varphi(Re_{*d}) = \varphi\left(\frac{R}{d}, \frac{C}{Re_d}, Re_d\right) \quad (4)$$

Для квадратичного потока $C = \varphi\left(\frac{R}{d}\right)$

и, следовательно, для квадратичного потока

$$f = \varphi\left(Re_d, \frac{R}{d}\right) = \varphi(Re_{*d})$$

Для значений $Re_d > 2 \cdot 10^5$ значение коэффициента лобового сопротивления для шара падает до $C_x = 0,2 = \text{const.}$ и, следовательно, для $Re_d > 2 \cdot 10^5$

$$f = \varphi\left(\frac{R}{d}\right) = \varphi(Re_{*d})$$

Таким образом число Рейнольдса, отнесенное к скорости касательного напряжения (скорости трения) v_* и к размеру зерна d , охватывает влияния: квадратичности или неквадратичности потока, квадратичности или неквадратичности обтекания зерна, и относительной шероховатости.

Если считать, что $f'' = 2g \frac{f'}{C_x} \cong \text{const.}$ то величина f , в основном, зависит от C_x :

$$f = \varphi\left(\frac{1}{C_x}\right) \quad (5)$$

и должна следовать за изменениями $C_x = \varphi(Re_d)$

Т. к. C_x для шара в пределах $Re_d = \text{от } 10^3 \text{ до } 2 \cdot 10^5$ изменяется слабо, от значения 0,4 до значения 0,5, то и f в этих пределах для Re_d должно почти оставаться постоянным.

Для значений $Re_d > 2 \cdot 10^5$ значение C_x падает вдвое и далее остается постоянным и, следовательно, значение f должно вдвое возрасти и далее оставаться постоянным.

Для формы зерна, отличной от шара, значение величины f должно следовать за значением C_x для измененной формы зерна. Так, для зерна пластинчатой формы, при обычном, черепицеобразном расположении пластинок в потоке, при угле атаки около $10-15^\circ$, значение C_x равно $0,15-0,20$, и значение f должно быть близким (несколько большим), чем величина, полученная для шара при $Re_d > 2 \cdot 10^5$ и раза в три больше такого же значения соответствующего $Re_d = 10^5$ до 15^5 .

По опытам Шоклича [1] для ламелей S_0 в $\sqrt{4,38} = 2,1$ раза больше чем для шара.

Влияние смеси разных фракций зерен наноса должно сказываться в том, что меньшие по размеру фракции дадут меньшее значение Re_d и, следовательно, большее значение C_x и меньшее значение f , чем крупные, что должно повлиять на средневзвешенное значение C_x и f , а следовательно, на интегральное значение S_0 .

При одной и той же средней крупности d_{cp} для смеси наносов изменение f приведет к изменению S_0 , если эти фракции дадут значения для C_x , лежащие по разные стороны $Re_d = 2 \cdot 10^5$.

Если скорости потока и крупности фракций настолько велики, что для основных фракций $Re_d > 2 \cdot 10^5$ (для наносов, близких к сферической форме), то f не будет зависеть от состава смеси и $S_0 = f(\gamma_n - \gamma) d_{cp}$ будет зависеть только от значения d_{cp} .

Следовательно, для наносов, влекаемых горными потоками с одной стороны ($Re_d > 2 \cdot 10^5$, и для опытов в лотках и на моделях — с другой стороны ($Re_d < 2 \cdot 10^5$), нет оснований для введения кроме d_{cp} для смеси наносов ещё и модуля смеси $M < 1$, введенного Крамером [6].

Как показали экспериментальные исследования USWES [2, стр. 43], Казея [3], Чанга [4], Индри [5], большое влияние, приписанное модулю смеси Крамером [6], поставившим S_0 в линейную зависимость от $\frac{d_{cp}}{M}$, не оправдалось.

Казей и Индри перешли к зависимости от $\frac{d_{cp}}{\sqrt{M}}$; Чанг [4, стр. 260] отрицает влияние M и пишет: "модуль неоднородности смеси M не имеет ничего общего с критической (начальной) влекущей силой и может быть опущен".

Изложенный выше анализ, основанный на связи f с C_x , приводит к обоснованию положений, частично установленных экспериментально, эмпирически.

Чанг, основываясь на результатах экспериментов, отмечает необходимость введения влияния отношения $\frac{d_{max}}{d_{min}}$. Это отношение должно влиять на C_x , а, следовательно, на f и таким образом полностью отражено в выражении

$$S_0 = f(\gamma_n - \gamma) d.$$

Дюбуа [7] еще в 1879 году пришел к такому же выражению для $S_0 = f(\gamma_n - \gamma) t'$, где t' — толщина одного слоя гальки, т. е. равно d_{cp} .

Но Дюбуа неправильно выразил расход донных наносов через

$$g = \phi S(S - S_0) = \gamma \frac{t' v_0}{2 S_0^2} S(S - S_0) = \gamma \frac{dv_0}{2} \frac{S}{S_0} \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right),$$

так как считал, что в расходе наносов участвует n слоев наноса и что движение слоев линейно затухает к n -му слою.

Индри [5], вводящий влияние модуля неоднородности наносов M , предлагает для S_0 выражение $S_0 = 0,030 (\gamma_n - \gamma) \frac{d_{cp}}{\sqrt{M}} - \kappa z / m^2$, полученное по лабораторным опытам.

Введение $\sqrt{M}$ искажает зависимость S_0 от d_{cp} и, следовательно, искажает зависимость f от Re_d .

Автором использованы опыты многочисленных исследователей (см. таблицу) и получена зависимость (фиг. 1) для $f = \varphi(Re_d)$ и для $S_0 = \varphi[(\gamma_n - \gamma) d_{cp}]$ (фиг. 2), которая дает для f значение 0,030 для малых Re_d и 0,6 для больших, что отвечает отмеченным выше изменениям C_x .

То обстоятельство, что для больших значений Re_d величина f остается неизменной, указывает на малое влияние относительной шероховатости и подтверждает предположение о том, что $f'' = 2g \frac{f'}{C_x^2} \cong \text{const.}$

Таким образом, многочисленные, обработанные автором опыты разных исследователей подтверждают зависимость, полученную Шильдсом [8] по немногочисленным опытам.

Переход от значения f , равного 0,030 (у Шильдса 0,033), к значению 0,060, Шильдс связал с условиями обтекания при различных соотношениях размера выступов шероховатости d и толщины ламинарного слоя.

Но Шильдс не дал приведенного выше обоснования перехода от минимального значения $f = 0,030$, к максимальному $f = 0,060$ для больших значений Re_d .

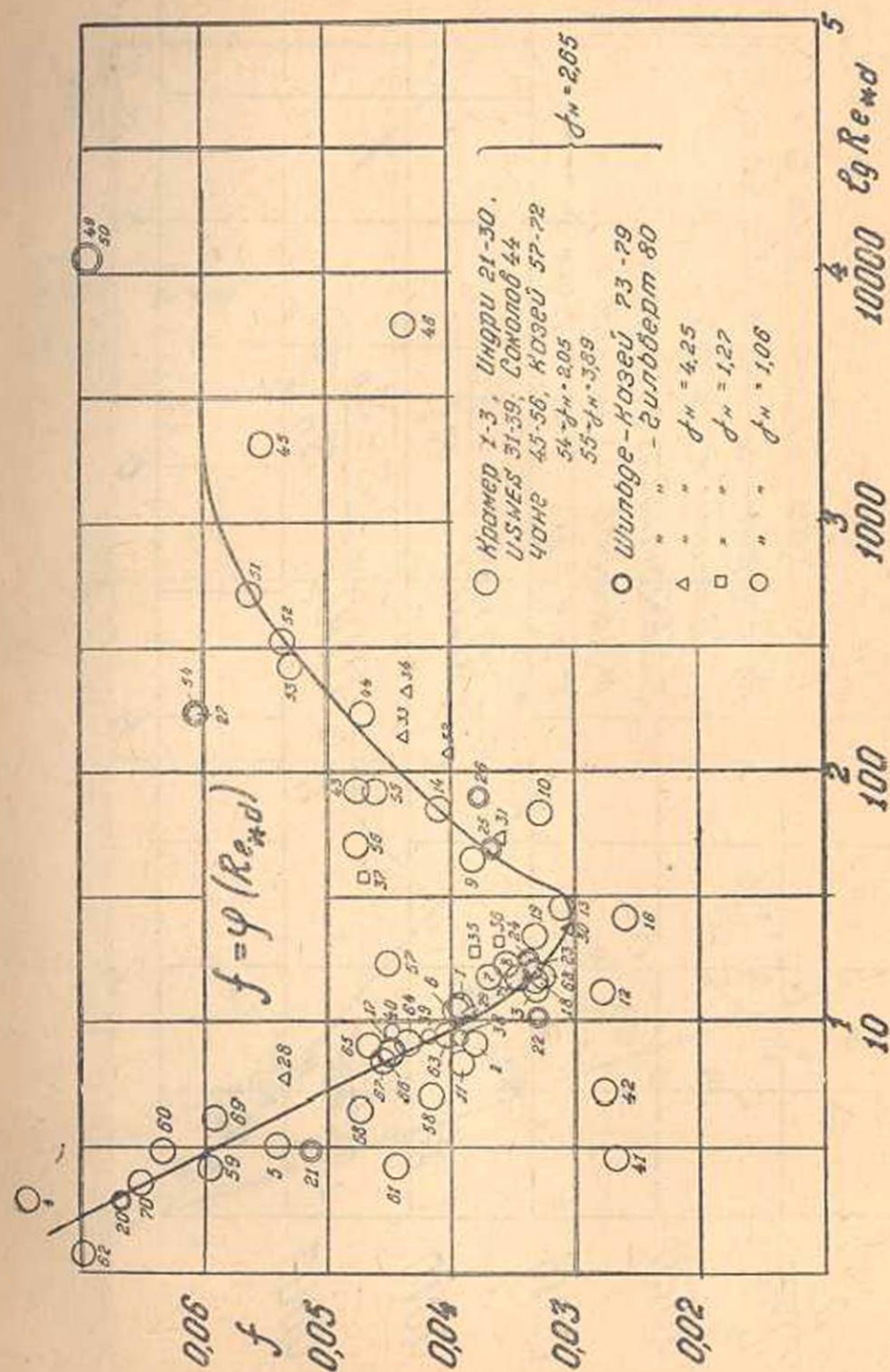
Для очень мелких фракций обтекание является ламинарным, что сказывается на значениях для S_0 и для f .

Шильдс показал, что S_0 стремится к постоянному пределу, равному

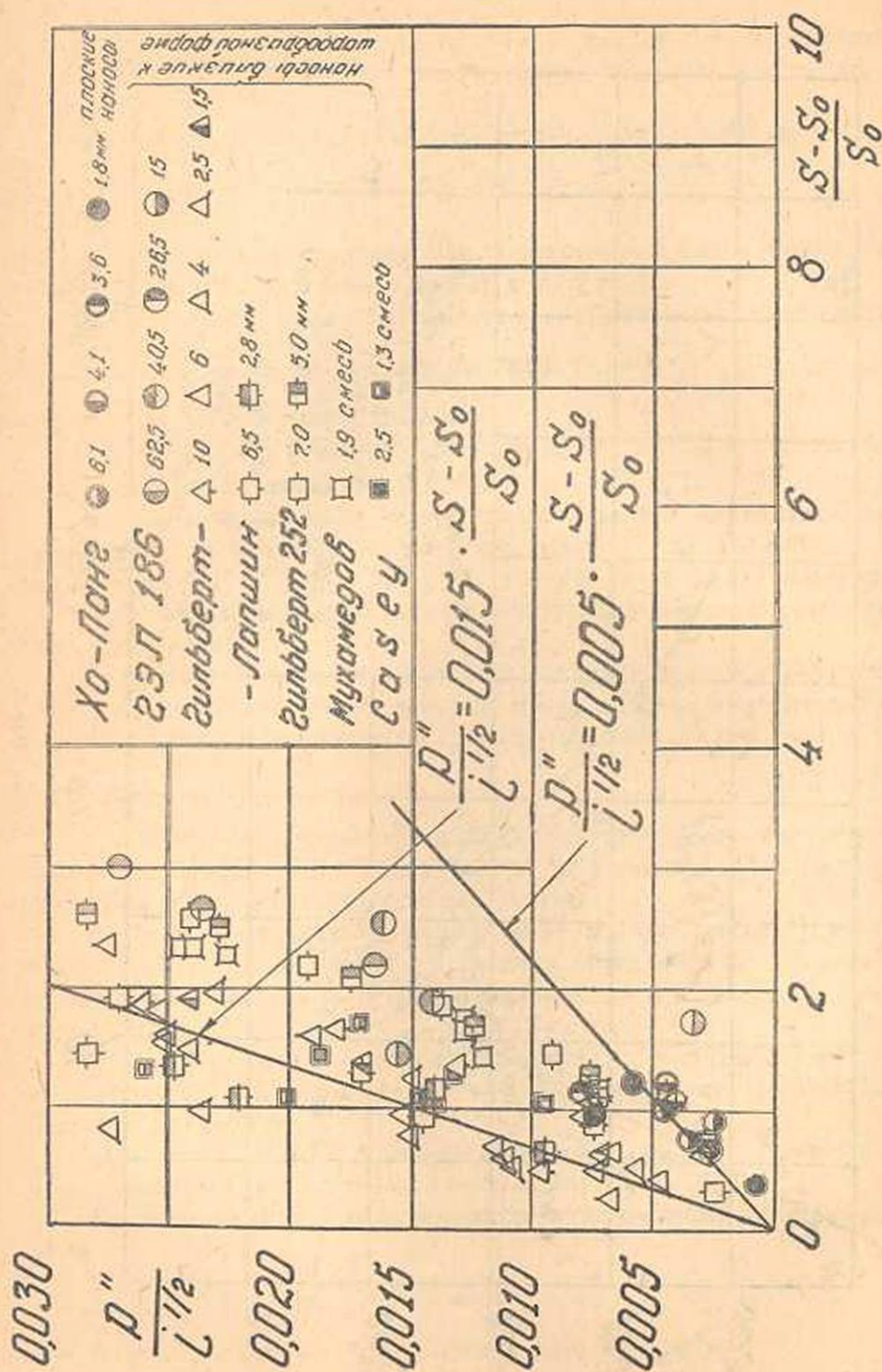
$$S_0 = \left(\frac{\gamma}{g} \right)^{1/2} [0,1 \vee (\gamma_n - \gamma)]^{1/2} \neq \varphi(d) \quad (6)$$

для $\gamma_n = 2,7; = 1; \gamma = 0,012$, значение $S_0 = 0,016 \kappa z / m^2$.

Следовательно, значения f возрастают в ламинарной зоне с уменьшением d и с уменьшением Re_d (см. фиг. 1).

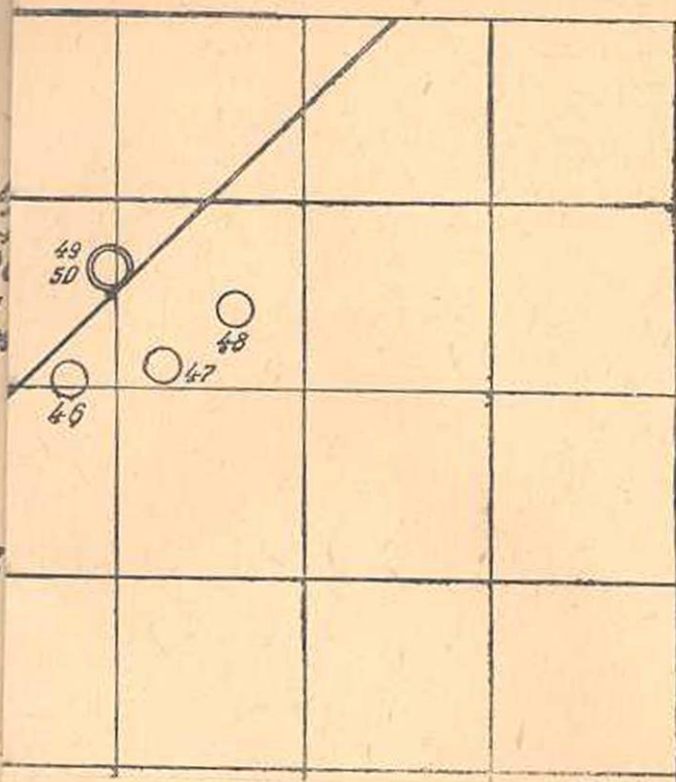


Фиг. 1.



tgS
ep/

3



Влияние формы зерна заметно сказывается при резком отходе формы от приближенно шарообразной.

На фиг. 3 дано сопоставление расхода влекомых наносов для обычных наносов и очень плоских, по опытам Хопанга [7]. На фиг. 3 видно уменьшение углового коэффициента в 3 раза, что соответствует изменению коэффициента f примерно в 2 раза.

Таким образом, в предложенном автором [10,11], для расхода влекомых наносов, критериальном уравнении с безразмерными комплексами

$$\frac{p''}{i^{1/2}} = \varphi \left(\frac{S - S_0}{S_0} \right) \quad (7)$$

необходимо считать S_0 с учётом влияния изменений коэффициента f .

Зависимость между комплексами $\frac{p''}{i^{1/2}}$ и $\frac{S - S_0}{S_0}$ получилась [10,11] линейная и $\frac{p''}{i^{1/2}} = 0,015 \frac{S - S_0}{S_0}$ расчетная формула для расхода наносов была приведена к такому виду:

$$q'' = \frac{0.015}{f} \gamma q' i^{1/2} \frac{R}{d} \left[1 - f \frac{\gamma_n - \gamma}{\gamma} \cdot \frac{d}{Ri} \right] \quad (9)$$

Поэтому, исходя из полученного на фиг. 1 и 2 значения $f=0,030$ при таких значениях Re_d , когда $C_x=0,4$, можно выразить f следующей зависимостью от C_x :

$$f = \frac{0.012}{C_x} \quad (10)$$

и уравнение для расхода влекомых наносов получит такое выражение:

$$q'' = C_x \gamma q' i^{1/2} \frac{R}{d} \left[1 - \frac{0.012}{C_x} \frac{\gamma_n - \gamma}{2} \frac{d}{Ri} \right] \quad (11)$$

Следовательно, для горных потоков, при неизбежно больших значениях Re_d , при C_x , близком к 0,2 для неплоских наносов, расход наносов будет, при прочих равных условиях, примерно вдвое меньше, чем по лабораторным экспериментам в лотках, для которых нужно считать $C_x=0,4-0,5$.

Таким образом, уравнение (11) моделирует явление при условии принятия правильного значения C_x в соответствии с режимом потока и условиями обтекания зерна.

Сопоставление данных различных исследований

№ опыта	Лаборатория автор	d мм	$d(\gamma_n - \gamma)$ гp/cm³	$S_0 = \gamma R_0 l$ гp/m²	lg S_0	lg $10^4[d(\gamma_n - \gamma)]$	$v_* = \sqrt{g R_0 l}$ см/сек	$Re_{*d} = \frac{v_* d}{\nu}$	lg Re_{*d}	$f = \frac{S_0}{d(\gamma_n - \gamma)}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Берлинская Лаборатория, Крамер	0,7	0,120	47	1,672	3,078	2,17	11,70	1,068	0,0392
2		0,56	0,095	36	1,555	2,978	1,90	8,20	0,913	0,0380
3		0,8	0,136	45	1,653	3,133	2,12	13,00	1,114	0,0330
4	То же, Казей	0,17	0,028	21	1,322	2,446	1,45	1,90	0,278	0,0750
5		0,27	0,044	24	1,380	2,647	1,55	3,22	0,507	0,5400
6		0,68	0,114	45	1,652	3,057	2,12	11,10	1,046	0,0396
7		0,87	0,144	53	1,724	3,158	2,30	15,35	1,186	0,0386
8		0,94	0,155	55	1,740	3,190	2,35	17,00	1,231	0,0355
9		1,75	0,290	112	2,115	3,462	3,35	45,00	1,653	0,0382
10		2,5	0,410	134	2,127	3,612	3,65	70,25	1,846	0,0327
11		0,5	0,082	32	1,506	2,916	1,79	6,88	0,837	0,0390
12		0,9	0,152	42	1,623	3,182	2,05	14,20	1,153	0,0276
13		1,3	0,217	67	1,826	3,336	2,60	26,00	1,464	0,0309
14		0,5	0,086	35	1,544	2,934	1,87	7,18	1,855	0,0408
15		0,9	0,148	48	1,680	3,170	2,20	15,25	1,183	0,0325
16		1,4	0,225	60	1,778	3,352	2,45	26,40	1,421	0,0256
17		0,5	0,875	39	1,591	2,941	1,98	7,60	0,880	0,0445
18		0,9	0,148	49	1,690	3,170	2,21	15,30	1,180	0,0330
19		1,25	0,205	68	1,831	3,312	1,61	25,00	1,348	0,0331
20	Берлинская Лаборатория, Шнальде	$\gamma_n = 2,7$	0,027	18	1,254	2,431	1,90	0,280	0,0667	
21			0,041	21	1,323	2,612	3,10	0,491	0,0513	
22			0,110	35	1,544	3,042	10,50	1,021	0,0328	
23			0,150	50	1,700	3,176	16,00	1,004	0,0333	
24		$\gamma_n = 4,25$	0,160	53	1,724	3,204	18,00	1,255	0,0331	
25			0,280	102	2,008	3,447	50,00	1,700	0,0365	
26			0,400	150	2,175	3,602	80,00	1,903	0,0375	
27			1,150	700	2,844	4,060	215,00	2,332	0,0605	
28			0,062	33	1,520	2,792	6,00	0,777	0,0533	
29			0,115	44	1,643	3,060	11,00	1,040	0,0383	
30			0,220	67	1,825	3,343	24,00	3,380	0,0304	
31			0,460	165	2,217	3,662	55,00	1,740	0,0359	
32			0,750	300	2,477	3,875	120,00	2,080	0,0400	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
33			0,870	380	2,580	3,939		140,00	2,146	0,0437
34			1,150	500	2,700	4,060		210,00	2,322	0,0433
35		$\gamma_n = 1,27$	0,045	17	1,230	2,653		19,00	1,279	0,0379
36			0,050	18	1,255	2,700		21,00	1,322	0,0360
37			0,068	32	1,504	2,832		38,00	1,579	0,0470
38		$\gamma_n = 1,06$	0,0092	3,6	0,556	1,964		8,70	0,940	0,0391
39			0,0092	3,8	0,579	1,964		8,80	0,945	0,0413
40			0,0092	4,1	0,613	1,964		9,10	0,960	0,0445
41	Падунская Ла-	0,32	0,053	14	1,146	2,724	1,18	2,9	0,462	0,0265
42	боратория,	0,47	0,081	22	1,342	2,905	1,48	5,35	0,728	0,0274
43	Индри	0,25	0,425	201	2,303	3,628	4,50	86,30	1,936	0,0475
44		0,40	0,680	319	2,503	3,852	5,65	173,50	2,239	0,0470
45		20,00	3,300	1810	3,258	4,518	13,50	2080,00	3,317	0,0550
46		45,00	7,450	3229	3,526	4,872	18,00	6250,00	3,795	0,0434
47		80,00	13,200	3674	3,564	5,121	19,10	11750,00	4,070	0,0270
48		125,00	20,500	5160	3,713	5,312	22,70	21800,00	4,338	0,0252
49		58,80	9,700	6718	3,827	4,986	26,00	11750,00	4,070	0,0693
50		58,80	9,700	6703	3,826	4,986	26,00	11750,00	4,070	0,0692
51	Манчестерская	8,1	1,250	705	2,848	4,096	8,40	523,00	2,718	0,0560
52	Лаборатория	6,5	1,020	544	2,735	4,008	7,40	370,00	2,567	0,0533
53	проф. Гибсона,	5,3	0,825	435	2,638	3,916	6,60	270,00	2,430	0,0528
54	Чанг	3,8	0,590	356	2,551	3,770	6,00	175,00	2,242	0,0605
55		2,5	0,412	189	2,275	3,614	4,35	83,50	1,921	0,0459
56		1,8	0,286	136	2,134	3,456	3,70	51,20	1,709	0,0475
57		0,89	0,142	64	1,806	3,152	2,53	17,30	1,238	0,4050
58		0,4	0,065	27	1,431	2,812	1,64	5,05	0,703	0,0415
59		0,27	0,037	22	1,343	2,568	1,48	2,62	0,418	0,0595
60		0,29	0,030	19	1,278	2,477	1,38	3,08	0,488	0,0635
61		0,21	0,061	27	1,431	2,785	1,64	2,65	0,423	0,0043
62		0,13	0,020	14	1,147	2,301	1,18	1,18	0,072	0,0700
63	Виксбургская	0,59	0,097	39	1,590	2,986	1,98	8,97	0,952	0,0402
64	лаборатория	0,54	0,090	39	1,590	2,954	1,98	8,23	0,915	0,0433
65	USWES	0,52	0,086	40	1,603	2,935	2,00	8,08	0,907	0,0465
66		0,51	0,083	37	1,578	2,919	1,92	7,53	0,876	0,0446
67		0,48	0,079	36	1,556	2,900	1,90	7,00	0,845	0,0453
68		0,35	0,057	27	1,431	2,755	1,64	4,40	0,643	0,0473
69		0,31	0,051	30	1,476	2,707	1,73	4,14	0,616	0,0590
70		0,20	0,034	22	1,342	2,527	1,48	2,27	0,356	0,0650
71		411	0,670	231	2,363	3,826	4,80	152,00	1,180	0,0345

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Schoklitsch—Ueber Schleppkraft und Geschiebepbewegung. 1914.
2. Paper 17 of the U. S. Waterways Experiment Station. 1935. Studies of river bed materials and their movement.
3. Casey—Ueber Geschiebepbewegung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, und Schiffbau, Heft 19, 1935.
4. Chang—Laboratory investigation of flume traction and transportation. Trans. Am. S. C. E., V. 104, 1247—1284, 1939.
5. Indri—Il problema del trasporto solido ed i risultati di recenti ricerche. Energia Elettrica. 1941. Feb., Marzo, Aprile.
6. Kramer — Modellgeschiebe und Schleppkraft. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Heft 9, 1932.
7. Dubois—Etude du regime du Rhône et de l'action exercée par les eaux sur un lit à fond de graviers infiniment affouillable. Ann. des ponts et chaussées. 1879.
8. Shields—Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Heft 26, 1936.
9. Ho-Paig-Yung—Abhängigkeit der Geschiebepbewegung von der Kornform und der Temperatur. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. Heft 37, 1939.
10. И. В. Егизаров—Расход взлкомых потоком наносов. Изв. АН Арм. ССР. (физ.-мат. естеств. и тех. наук) т. II, № 5, 1949.
11. И. В. Егизаров—Расход доинных наносов. ДАН Арм. ССР, т. XI, № 4, 1950.

Ի. Վ. Եգիզարյան

ՀՈՍԱՆՔՈՎ ՏԱՐՎՈՂ ԶՐԱԲԵՐՈՒԿՆԵՐԻ ՏՐԱՆՍՊՈՐՏԻ ՍԿԶԲՆԱԿԱՆ
ՏԱՆՈՂ ՈՒԺԻ ՈՐՈՇՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Շրջանուման մեջ գտնվող ջրաբերուկի հատիկի վրա հոսանքի ճակատային ազդեցությունը համեմատելով հոսանքով ջրաբերուկները տանելու անհրաժեշտ ուժի հետ, կարելի է (1)–(3) հավասարումներով որոշել սկզբնական տանող ուժը, որտեղ C_x —ճակատային դիմադրության համարիչը չունեցող զործակիցն է և որտեղ f —նույնպես համարիչ չունի:

Այդպիսով՝

$$f = \varphi \left(Re_d, \frac{R}{d}, \frac{C}{Re_d} \right) \approx \varphi(Re_d) = \varphi \left(\frac{f}{C_x} \right),$$

որը հաստատվում է փորձով:

Շիլդսը ցույց է տվել, որ $f = \varphi(Re_d)$.

C_x փոփոխությունները որպես ֆունկցիա Ռեյնոլդսի թվից, լավ ուսումնասիրված են, որը թույլ է տալիս որոշել f զործակիցի հնարավոր փոփոխությունները և սահմանել, որ հատիկների համար, որոնց ձևը մոտ է գնդայինին, հնարավոր են f -ի մատավորապես կրկնակի փոփոխություններ՝

կապված C_x -ի նույնպիսի փոփոխությունների հետ $Re_d = 2 \cdot 10^5$ -ից անցման դեպքում:

Հնարավորություն է ստացվում որոշել $\bar{\gamma}$ նաև թիթեղաձև ջրաբերուկների համար:

Մեծ արագություններով և համեմատաբար խոշոր ջրաբերուկներով հոսանքներում $\bar{\gamma}$ գործակիցը բոլոր հիմնական ֆրակցիաների համար մնում է հաստատուն, եթե այդ բոլոր ֆրակցիաների համար $Re_d > 2 \cdot 10^5$ և այդ պատճառով այդպիսի խառնուրդի համար սկզբնական տանող ուժը և հատակային հոսանքով տարվող ջրաբերուկների ելքը բավականին լրիվ է որոշվում d_{cp} մեծությամբ:

Նույնը վերաբերում է նաև լոտոկների մեջ ջրաբերուկներով փորձերին, քանի որ դեպքերի մեծ մասի համար Re_d փոքր կլինի $2 \cdot 10^5$ -ից և C_x -ի փոքր տատանումներին համապատասխան $\bar{\gamma}$ -ը կատանվի փոքր սահմաններում:

Միայն փոքր արագություններ և ջրաբերուկների մանր ֆրակցիաներ ունեցող հոսանքների համար S_0 և $\bar{\gamma}$ (ջրաբերուկների ծախսը) արժեքների վրա, բացի d_{cp} մեծության ազդեցությունից, լրացուցիչ կազդի խառնուրդի բաղադրությունը, բայց այդպիսի ազդեցությունը հաշվի կառնվի հաշվարկումների մեջ մտցնելով C_x -ի և հետևաբար $\bar{\gamma}$ -ի համար համապատասխան արժեք: Այդ պատճառով կրամերի մոցրած խառնուրդի անհամասեռության մոդուլն իր իմաստը կորցնում է. խառնուրդի M մոդուլ մտցնելու անհիմն լինելու մասին հետևություններ էմպիրիկորեն եկել է Չանգը և մասամբ կազեյը, Ինդրին և Ամերիկական լաբորատորիան՝ USWES.

Օգտագործելով բաղմամբիվ հետազոտողների փորձերը, հեղինակն ստացել է կախում $\bar{\gamma} = \varphi(Re_{*d})$ համար (ֆիգ. 1) և $S_0 = \varphi[(\gamma_n - \gamma)d_{cp}]$ համար (ֆիգ. 2). Այդ կախումը տալիս է փոքր Re_{*d} համար $\bar{\gamma} = 0.030$ և մեծ Re_{*d} համար $\bar{\gamma} = 0.06$, որոնք համապատասխանում են C_x -ի վերը նշված փոփոխություններին:

Այն հանգամանքը, որ Re_{*d} -ի մեծ արժեքների համար $\bar{\gamma}$ -ի մեծությունը մնում է անփոփոխ, ցույց է տալիս համեմատական հարթության փոքր ազդեցությունը և հաստատում է այն ենթադրությունը, որ

$$\bar{\gamma} = \varphi\left(\frac{1}{C_x}\right);$$

Այսպիսով, տարբեր հետազոտողների բաղմամբիվ փորձերի մշակումը հեղինակի կողմից հաստատում է այն կախումը, որն ստացել է Շիլդսը տարբեր տեսակարար կշիռ ունեցող ջրաբերուկների հետ կատարած իր ոչ մեծաքանակ փորձերով:

Անցումը $\bar{\gamma} = 0.030$ (Շիլդսի մոտ $\bar{\gamma} = 0.033$) դեպի $\bar{\gamma} = 0.060$ Շիլդսը d -ի անոդոսկոպիայի կրուտների չափսերի և $\bar{\gamma}$ -ի (լամինար շերտի հաստության) տարբեր հարաբերությունների դեպքում կապեց շրջահոսման պայմանների հետ: Բայց Շիլդսը չափեց $\bar{\gamma} = 0.030$ մինիմալ արժեքից Re_d մեծ արժեքների համար $\bar{\gamma} = 0.060$ մաքսիմալին անցնելու վերը բերված հիմնավորումը:

Շատ փոքր ֆրակցիաների համար շրջահոսումը լամինար է, որն անդրադառնում է S_0 և $\bar{\gamma}$ արժեքների վրա:

Շիլդսը ցույց է տվել, որ S_0 ձգտում է (6) հավասարումով ար-

տաճայտված հաստատուն սահմանի, $\gamma_u = 2,7$, $\gamma = 1$, $\nu = 0,012$ համար $S_0 = 0,16$ կգ/մ²,

Հետևաբար $\bar{f}$ -ի արժեքը լամինար ղոնայում աճում է d և Re_d նվազմանը զուգընթաց (տես ֆիգ. 1):

Հատիկի ձևի ազդեցությունն արտահայտվում է զդալի կերպով, եթե այն խիստ շեղվում է գնդայինին մոտ ձևից:

Յ-րդ ֆիգուրայի վրա համեմատության մեջ են դրված ջրաբերուկների ծախսը (ըստ Հիգրոէլեկտր. լաբորատորիայի փորձերի և շատ տափակ ջրաբերուկների ծախսը (ըստ Խոպանգի փորձերի): Նույն ֆիգուրայից երևում է հավասարման անկյունային գործակցի 3 անգամ նվազումը, որը համապատասխանում է 1 գործակցի փոփոխմանը մոտ 2 անգամ:

Այսպիսով, տարվող ջրաբերուկների ծախսի համար հեղինակի (10, 11) առաջարկած չափում չունեցող կոմպլեքսներով հայտանշային (կրիտերիալ) հավասարման մեջ (7) անհրաժեշտ է S_0 որոշել հաշվի առնելով 1 գործակցի փոփոխությունների ազդեցությունը:

Պարզվեց, որ չափում չունեցող $\frac{p''}{i^{1/2}}$ և $\frac{S-S_0}{S_0}$ կոմպլեքսների միջև

կապը գծային է (10, 11), և (7) հավասարումը բերվում է (8) հավասարման տեսքի: Ջրաբերուկների ծախսի հաշվարկային բանաձևը բերված է (9) հավասարման տեսքի: Այդ պատճառով ելնելով ֆիգ. 1 և 2 վրա ստացված $\bar{f} = 0,030$ արժեքից, Re_d այն արժեքների ղեկավարում, երբ $C_x = 0,4$, $\bar{f}$ կարելի է արտահայտել (10) հավասարումով և տարվող ջրաբերուկների ծախսի համար հավասարումը կստանա (11) նոր արտահայտությունը:

Հետևաբար, լեռնային հոսանքների համար, այլ հավասար պայմանների ղեկավարում Re_d -ի անխուսափելի մեծ արժեքների համար, այսինքն $\bar{f} = 0,2$ ղեկավարում ոչ տափակ ջրաբերուկների համար նրանց ծախսը կլինի մոտ 2 անգամ ավելի փոքր, քան լոտոկների մեջ լաբորատոր փորձերում, որոնց համար պետք է հաշվել $C_x = 0,4 - 0,5$:

Այսպիսով, (11) հավասարումը մոդելացնում է երևույթը, եթե ընդունվում են հոսանքի ռեժիմի և հատիկի շրջահոսման պայմանների համապատասխանող արժեքները: