

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. ГАСПАРЯН, А. А. ЗАМИНЯН

СТЕСНЕННОЕ ПАДЕНИЕ ЧАСТИЦ

Стесненное падение монодисперсных сферических частиц

(Сообщение 2)

В сообщении [1] было показано, что все авторы, исследовавшие стесненное падение, предлагают уравнения, могущие быть приведенными к виду:

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

Подразумевается, что оно относится к монодисперсным сферическим (или почти сферическим, сильно округлым) частицам. Там же показано наличие больших расхождений в уравнениях различных авторов, несмотря на структурную идентичность этих уравнений типа (1). Было высказано мнение, что эти расхождения следует объяснить неодинаковостью условий экспериментов и недостаточностью учета различных факторов, могущих повлиять на точность и объективность получаемых опытных величин, то есть неудовлетворительной разработанностью методики эксперимента.

Там же [1] изложены результаты исследований методики взвешенного слоя и те требования, соблюдение которых обеспечивает получение надежных опытных данных.

С целью уточнения величин K и n (и их зависимости от числа Рейнольдса), входящих в уравнение (1) и обуславливающих расхождения в данных различных авторов, нами были проведены соответствующие экспериментальные исследования, результаты которых излагаются ниже.

Примененные твердые частицы и среды для их взвешивания

Одним из важнейших требований является доброкачественность применяемых для эксперимента частиц. Они должны быть: а) однородными по плотности, б) строго сферическими по форме и в) по возможности одинаковыми по величине — монодисперсными. Нами для экспериментов были применены частицы из следующих материалов:

Стеклянные шарики, изготовленные ранее описанным способом [2], выделялись в фракции путем просеивания и гидравлической сепарации. По форме они вполне сферичны, что видно из рисунка 1, на котором изображены шарики диаметром 68,1 микрона.

Парафиновые шарики готовились по способу, изображенному на рисунке 2.

Расплавленный парафин из колбы 2, помещенной в ультратермостате 1, где поддерживается температура 80—90°С, выдавливается воздухом через монжусную грубку 3 в колонку 5, заполненную водой. Воздух, выдавливающий жидкий парафин,

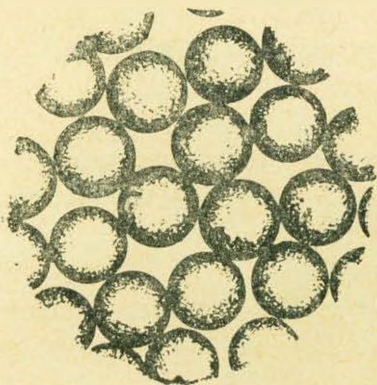


Рис. 1.

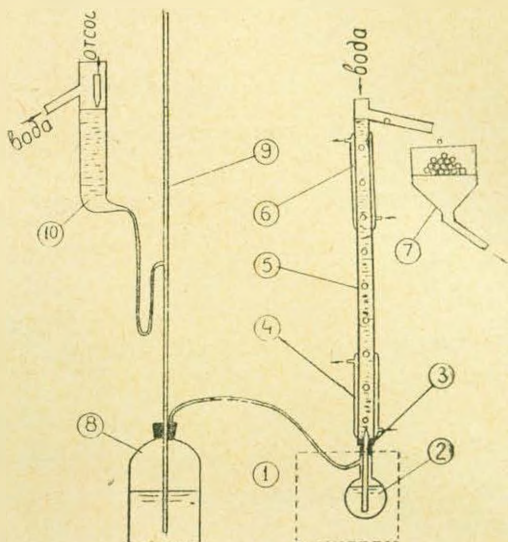


Рис. 2.

находится под постоянным напором воды, осуществляемым установкой, состоящей из сосуда постоянного напора 10, пьезометрической трубки 9 и баллона 8.

Выходящий из наконечника трубки 3 жидкий парафин принимает форму капли, которая, вырастая до определенного размера, отрывается, имея при этом сферическую форму, а на ее месте образуется новая капля. Подогревателем 4 и холодильником 6 создается режим, благоприятный для затвердевания капли по возможности с меньшим деформированием сферической формы. При затвердевании объем парафина сильно уменьшается, поэтому быстрое охлаждение капелек приводит к сильным деформациям.

Свинцовые шарики выделялись из большой партии охотничьей дроби.

Стальные монодисперсные шарики представляли собой продукцию подшипникового завода, имели сферическую форму и практически одинаковый размер: 1 мм в диаметре.

Монодисперсные чугунные шарики были получены из чугунной дроби. Около 30 кг дроби, в которой имелись шарики от 1 до 3 мм, были просеяны через сито размером 2 мм. Прошедшие через сито и не прошедшие отбрасывались, а те шарики, которые застревали в отверстиях сита, собирались отдельно как более монодисперсная фракция. Таким образом, было выделено около 1 кг шариков, затем повторным пропуском через сито отобрано 0,5 кг, которые в дальнейшем были использованы.

Алюмосиликатные, почти монодисперсные шарики были выделены из большой партии шарикового катализатора для крекинга нефти. Выделение отдельных размеров проводилось так, как в вышеописанном случае выделения двухмиллиметровых чугуновых шариков.

Для выявления степени монодисперсности и для определения точного размера были отобраны средние пробы из полученных шариков, и из этих проб по 50—100 штук для каждого вида были тщательно обмерены. Диаметр каждого шарика измерялся в пяти направлениях и бралось среднеарифметическое значение; из полученных значений рассчитывалось среднее значение диаметра для испытываемых частиц.

В табл. 1 сведены результаты измерений.

Таблица 1

Средний диаметр монодисперсных частиц в м.м	2,897	2,426	2,119	1,983	1,3015	0,9716
Макс. процент отклонения от среднего значения диаметра (степень монодисперсности)	3,0	3,5	4,5	3,1	3,0	6,4
Макс. отклонения от среднего диаметра в отдельном шарике (степень сферичности шарика)	2,0	1,9	1,2	2,0	1,9	0,5

Алюмосиликатные шарики сильно пористы, причем, как показали определения, для различных размеров шариков пористость имеет постоянное значение и равна $m = 0,539$. При помещении в воду шарики полностью заполняются водой. Плотность алюмосиликатных шариков, насыщенных водой, не зависит от размеров шариков и равна $1,65 \text{ г/см}^3$. Можно также расширять алюмосиликатные шарики в других средах, только для этого необходимо тщательно высушить их, насытить новой средой и определить плотность либо пикнометрически, либо исходя из пористости.

Основные данные по всем примененным нами частицам сведены в табл. 2. Среднее значение диаметров сфер, за исключением алюмосиликатных, определено весовым способом по выражению:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6G}{\pi n \rho}},$$

где n — число отсчитанных и взвешенных частиц, ρ — их плотность. Все приведенные в таблице плотности определены нами. Под „степенью монодисперсности“ подразумевается соотношение диаметров наибольших и наименьших частиц, входящих в данную фракцию. Эта величина для стеклянных шариков определена при помощи микроснимков. Для парафиновых шариков по размерам сит, за исключением частиц с диаметром 0,2475, являющихся почти монодисперсными и изготовленными специальным, трудоемким, способом.

В качестве среды использовались: вода при различных температурах — от 10 до 90°C, глицериновые водные растворы (от 20 до 95%,
3. Изв. ТН, № 5

Таблица 2

Данные Материал	Фракции сфер	Средний диаметр сфер см	Плотность в г/см ³	Степень монодисперсности α
I. Стеклопные шарики	—270 меш.	0,00681	2,49	1,22
"	—200+270 меш.	0,0071	2,49	1,22
"	—140+200 меш.	0,00887	2,49	1,40
"	—100+140 меш.	0,01274	2,49	1,40
"	—70+100 меш.	0,01805	2,49	1,40
"	—50+70	0,0274	2,49	1,30
Парафиновые шарики	—0,84+0,7 мм	0,0769	0,905	1,20
"	—1+0,84 мм	0,0887	0,908	1,20
"	—1,29+1 мм	0,1075	0,9085	1,29
"	—1,68+1,29 мм	0,1506	0,906	1,30
"	—2+1,68 мм	0,1895	0,908	1,20
"	—2,5+2 мм	0,2335	0,906	1,25
"	—3+2,5 мм	0,2942	0,89	1,20
"	—	0,2475	0,9075	1,05
Свинцовые шарики	—1+1,29 мм	0,1225	11,0	1,29
"	—	0,350	11,0	1,15
Стальные шарики	—	0,100	7,76	1,01
Чугунные шарики	—	0,2005	7,54	1,10
Алюмосиликатные шарики	3 мм	0,2897	1,65	1,06
"	2,4 мм	0,2426	1,65	1,07
"	2 мм	0,1983	1,65	1,06
"	1,29 мм	0,13015	1,65	1,07
"	2,14 мм	0,2119	1,65	1,09
"	1 мм	0,09716	1,65	1,13
"	1,29 мм	0,13015	1,77	1,07
"	2 мм	0,09716	1,77	1,13

глицерина), содовые растворы плотностью до 1,05 г/см³ и бромформ плотностью 2,87 г/см³.

Измерение С. Обработка опытного материала

Скорость стесненного падения C измерялась способом взвешенного слоя с учетом по возможности всех требований, вытекающих из изучения вопросов методики [1].

В зависимости от условий были применены шесть различных схем осуществления способа взвешенного слоя.

1. Схема для расширения водой при малых расходах, в пределах комнатных температур. Основной частью схемы, изображенной на рис. 3, является прибор, состоящий из градуированного полого стеклянного цилиндра, в нижнем конце которого, у деления ноль, установлена сетка для поддержания частиц. В верхней части цилиндра припаян отвод для слива воды. Цилиндр вставляется в более широкую трубку, заполненную свинцовыми шариками для обеспечения равномерности подхода потока. Заранее охарактеризованный материал определенной навески засыпался в цилиндр на сетку и взвешивался потоком воды.

Вода из водопровода 1 подается в напорный бак 3, снабженный электроподогревателем 4, откуда самотеком по трубке 5 поступает в сосуд постоянного напора 6, из которого излишек воды удаляется водоструйным насосом. Подача воды регулируется съёмными наконечниками 13 и изменением высоты уровня в сосуде 6. Вода после колонки расширения поступает в воронку 8 и сливается.

Термометрами 9, 10 и 11 контролируется температура воды, а термометром 12 — температура воздуха вокруг прибора.

При нормальной работе установки производились следующие замеры:

объемной скорости подачи воды, высота взвеси соответствующей данной скорости воды и температуры термометрами 10, 11 и 12. Постоянство комнатной температуры обеспечивалось электронагревательным шкафом с автоматической регулировкой температуры электронным реле.

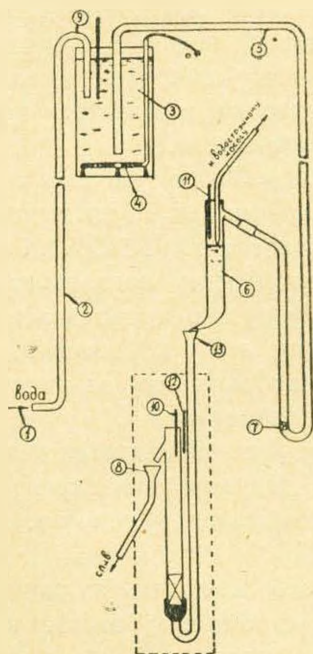


Рис. 3.

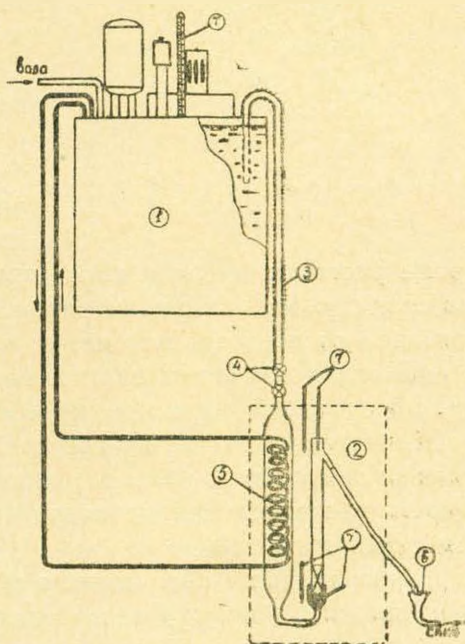


Рис. 4.

2. *Схема для расширения при высоких температурах (ниже точки кипения среды)*, рис 4. Нагретая до требуемой температуры в ультратермостате 1 вода, по трубке 3 поступает в подогреватель 5, откуда поступает на прибор, последний вместе с подогревателем вмонтирован в воздушный термостат 2. Замеры те же, что и при схеме 1. Расход регулируется кранами 4. Температурный контроль осуществляется пятью выверенными термометрами 7.

3. *Схема для работы при больших расходах воды.* Когда необходимы большие расходы воды (до 1 л/сек), что имеет место при взвешивании частиц, имеющих большие значения Re , работа по схеме

рис. 3 невозможна. Надежной средой с устойчивой температурой является водопроводная вода, при условии большого расхода последней.

4. *Схема для работы с ограниченным количеством среды.* В случае работы с жидкостями, количество которых не превышает нескольких литров, использовалась схема, изображенная на рис. 5.

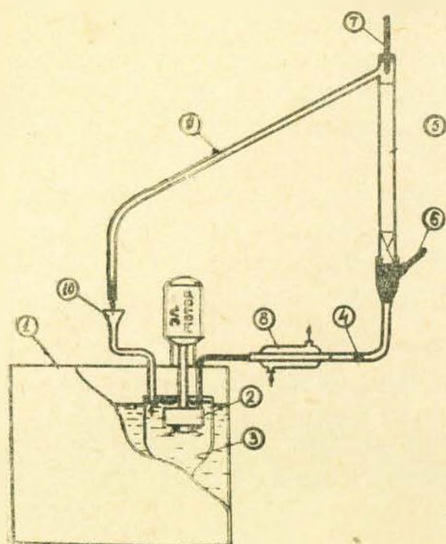


Рис. 5.

Основной частью схемы является ультразвуковой термостат 1, у которого снят перемешивающий пропеллер. и насос 2 погружен в воронку с рабочей средой. Среда из емкости 3 насосом 2 подается в колонку 5, где происходит расширение. Колонка снабжена двумя термометрами 6 и 7, расход среды регулируется краном 4. При работе с вязкими жидкостями возможен местный нагрев 2, поэтому на пути среды установлен холодильник 8, который включается по мере необходимости.

5. *Схема для работы с концентрированными растворами глицерина (от 80 до 100°С).* Глицериновые

растворы высокой концентрации интенсивно поглощают влагу из воздуха. Работу с глицерином поэтому нужно проводить в изолированной от воздуха системе, во избежание его разбавления, что приводит к резким изменениям вязкости. Изображенная на рисунке 6 схема обеспечивает нормальную работу на глицерине.

Жидкость из напорного сосуда 7 по трубке 19 подается в колонку для расширения 8, расход жидкости регулируется краном 14, жидкость после колонки проходит через измерительную емкость 9 и затем сливается в сборник.

Одновременно с наполнением сборника 6 жидкость из ранее наполнившегося сборника 5 перекачивается, с помощью азота, в напорный сосуд 7, с такой скоростью, чтобы уровень в 7 не изменялся. Таким образом, обеспечивался постоянный расход жидкости. Жидкость из сборника 5 перекачивается в 7 следующим образом. Азот из баллона высокого давления 1, через редуктор 2, поступает в ресивер 4, откуда — в сборник 5. Под давлением азота жидкость по трубопроводу 18 поступает в сосуд 7. За некоторое время до полного наполнения сборника 6 сборник 5 подготавливается к приему жидкости: закрывается линия подачи в 7, сбрасывается давление и открывается доступ жидкости из 8. Затем ставится на выдавливание сборник 6, путем переключений зажимов 20.

Описанным способом можно обеспечить непрерывную работу установки на любое время. Напорный сосуд 7 „дышит“ через хлор-

кальцевую трубку 11. Контроль за давлением в системе осуществляется при помощи ртутного манометра 3. На выходе и входе жидкости в колонку 8 установлены термометры 12, 13 с делениями $0,1^{\circ}\text{C}$.

Кран 16 служит для отключения сосуда 7 от системы при остановках, а зажим 17—для слива жидкости из 7.

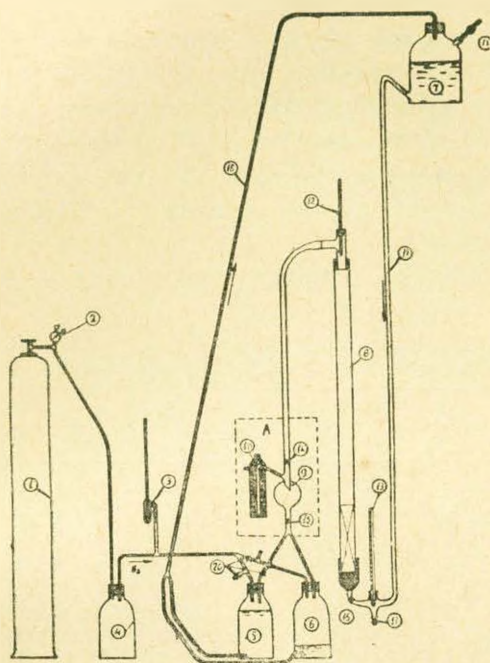


Рис. 6.

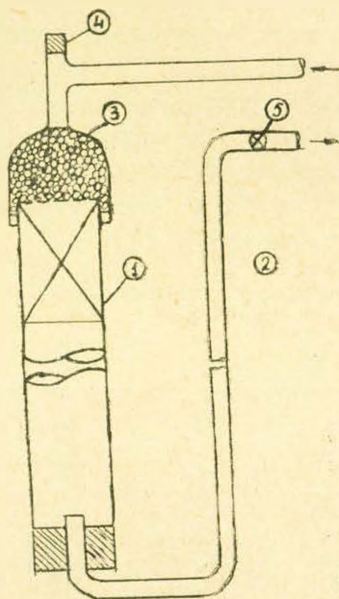


Рис. 7.

Измерение расхода среды. Для измерения расхода служит приспособление, изображенное на узле А. Когда не производятся замеры расхода, и жидкость поступает в один из сборников, измерительная емкость 9 пуста (кран 15 открыт). При измерении расхода кран 15 закрывается и фиксируется время заполнения 9 от нижней метки до верхнего отвода. При заполнении 9 находящийся в измерительной емкости газ выдавливается в атмосферу через хлор-кальцевый влагоулавливатель 10. Как только уровень жидкости в 9 достигает до верхнего отвода, открытием крана 15 жидкость сливается в сборник. Емкость 9 заполняется очищенным от влаги воздухом из 10. Объем 9 предварительно откалиброван на воде и на глицерине.

6. *Схема для взвешивания смеси частиц меньшей плотности, чем среда.* Среда насосом термостата подается в верхнюю часть колонки расширения (рис. 7) и, пройдя слой свинцовых шариков 3 для равномерности подхода потока, расширяет смесь частиц 1 и затем по 2 поступает обратно в термостат. Подача жидкости на расширение регулируется краном 5. Отвод 4 служит для периодического удаления возможных накоплений воздуха. Замеры аналогичны замерам схемы 1.

В случае работы с парафиновыми частицами лучше в качестве среды применять содовые растворы. В чистой воде они образуют агрегаты, что нарушает равномерность взвеси.

По описанным схемам, в средах, указанных выше, и с частицами, приведенными в табл. 2, было произведено 47 серий опытов по определению скоростей стесненного падения.

Для иллюстрации приводится один пример (серия № 43) таких измерений и обработки полученных данных. Все остальные серии опытов идентичны приведенному примеру. Объект расширения стальные шарики $d = 0,10$ см; $\rho = 7,76$ г/см³, навеска 39,42 г, монолитный объем навески $39,42; 7,76 = 5,08$ см³; среда — вода, средняя температура 25°C. Диаметр колонки $D = 1,525$ см, ее сечение $F = 1,818$ см². Измерения проводились по схеме 1.

В табл. 3 приведены первичные лабораторные записи и подсчеты серии № 43.

Таблица 3

Взвешивание монодисперсных стальных шариков в $d = 0.1$ см в воде (серия № 43)

№ опытов	V	Q	θ	t	C	φ
1	9,7	98,0	12,7	25,0	4,24	0,524
2	9,7	231,0	30,0	25,1	4,24	0,524
3	10,2	228,0	26,6	25,0	4,72	0,498
4	10,2	234,0	27,3	25,1	4,72	0,498
17	15,7	254,0	13,4	25,1	10,42	0,323
18	15,7	240,0	12,6	25,1	10,47	0,323
19	16,9	427,0	20,7	25,1	11,34	0,300
20	16,9	417,0	20,4	25,1	11,23	0,300
27	25,4	456,0	15,4	25,2	16,28	0,200
28	25,4	459,0	15,5	25,2	16,28	0,200
29	28,4	463,0	14,6	25,0	17,3	0,180
30	28,3	463,0	14,7	25,1	17,4	0,179
35	42,4	484,0	12,4	25,2	21,48	0,120
40	60,0	492,0	11,2	25,0	24,1	0,0848
41	94,0	482,0	9,35	25,2	28,35	0,0511
42	91,0	487,0	9,70	25,4	27,65	0,0559
43	77,0	486,0	10,2	25,0	26,2	0,066
44	77,0	486,0	10,2	25,1	26,2	0,066
45	50,8	482,0	11,55	25,0	22,93	0,100
46	30,0	472,0	14,3	25,0	18,17	0,1695

Примечание к табл. 3. V — Объем взвешенного, слоя см³.

Q — Расход воды, см³/сек.

t — температура среды, С.

C — скорость в свободном сечении колонки, см/сек.

φ — объемная доля твердой взвеси

$$C = \frac{Q}{\theta F}; \quad \varphi = \frac{G_{\text{нав.}}}{\rho_{\text{нав.}} V}$$

По подсчитанным значениям C и φ (табл. 3) строится кривая $C = f(\varphi)$ (рис. 8). С этой кривой снимаются данные первого и второго столбцов таблички (рис. 8) и по цифрам столбцов три и четыре строится линия $\lg C = f_1(\lg m)$.

Основные показатели всех 47 серий опытов сведены в табл. 4.

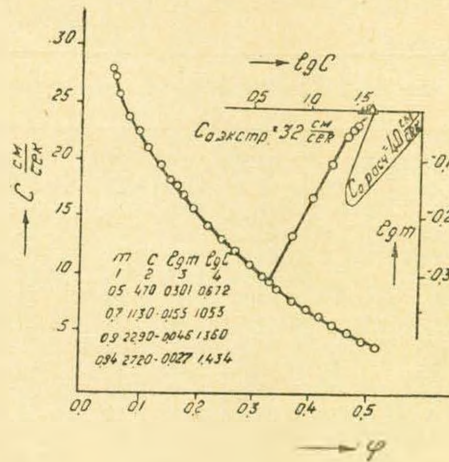


Рис. 8.

Таблица 4

Сводка основных показателей опытов

№ серии	Re	Частицы			Среда		D/d	C_0 расчетн.	C_0 экстрапо- лиров.	K	n
		d	ρ_1	наве- ска г	μ	ρ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,0126	0,0071	2,49	2,48	0,0485	1,124	138	0,0765	0,0765	1,0	5,13
2	0,0382	0,0972	1,77	24,93	0,980	1,216	28	0,317	0,258	0,81	4,80
3	0,0753	0,2005	7,54	110,0	0,810	1,247	14	2,05	1,86	0,91	5,10
4	0,0846	0,1301	1,77	38,3	0,935	1,216	21	0,50	0,462	0,93	4,70
5	0,179	0,00618	2,49	1,045	0,01	1,000	158	0,290	0,306	1,06	4,60
6	0,269	0,0071	2,49	5,44	0,01	1,000	180	0,379	0,407	1,08	5,0
7	0,511	0,0087	2,49	3,8	0,01	1,000	110	0,577	0,660	1,15	4,92
8	0,565	0,100	7,76	25,0	0,8272	1,219	15	3,82	3,82	1,00	4,84
9	0,603	0,00887	2,49	4,76	0,1091	1,00	143	0,621	0,660	1,05	4,92
10	0,900	0,205	7,54	110,0	1,78	1,227	14	6,33	5,20	0,82	4,60
11	0,945	0,01274	2,49	5,53	0,0123	1,00	100	0,91	0,91	1,00	4,70
12	1,412	0,01274	2,49	4,64	0,0099	1,00	100	1,10	1,10	1,00	4,57
13	2,410	0,100	7,76	25,0	0,3742	1,200	15	7,52	5,70	0,84	4,32
14	3,58	0,01805	2,49	3,40	0,01	1,00	54	1,98	1,78	0,90	4,23
15	4,73	0,100	7,76	25,0	0,2538	1,189	15	10,1	8,15	0,80	4,17
16	9,66	0,100	7,76	25,0	0,163	1,175	15	13,4	11,2	0,88	3,92
17	9,76	0,0274	2,49	2,81	0,01	1,00	36	3,56	3,07	0,86	4,00
18	10,48	0,0274	2,49	2,89	0,0096	1,00	36	3,66	3,25	0,83	3,83
19	13,1	0,0769	0,905	48,09	0,0124	1,046	44	2,01	1,59	0,78	3,6
20	17,4	0,0887	0,908	49,30	0,0121	1,036	38	2,28	1,89	0,84	3,54
21	18,6	0,0274	2,49	2,53	0,0065	0,991	36	4,44	4,00	0,90	3,54
22	23,2	0,100	7,76	25,0	0,0894	1,152	15	17,97	14,8	0,87	3,60
23	26,2	0,1076	0,908	47,38	0,0121	1,036	32	2,84	2,24	0,81	3,30
24	32,9	0,0274	2,49	2,53	0,0044	0,98	36	5,45	4,85	0,89	3,42
25	48,4	0,0274	2,49	2,53	0,0033	0,969	36	6,17	5,32	0,86	3,26
26	54,3	0,1506	0,906	46,5	0,0121	1,036	23	4,18	3,38	0,88	3,25
27	56,2	0,100	7,76	25,0	0,0473	1,120	15	23,75	19,00	0,85	3,23
28	58,2	0,0972	1,65	24,61	0,0129	1,00	28	7,75	6,23	0,80	3,16
29	76,0	0,109	1,65	30,0	0,0129	1,00	25	8,90	7,00	0,78	3,06
30	90,8	0,1895	0,908	45,99	0,0117	1,036	18	5,39	3,95	0,84	3,03
31	95,5	0,100	7,76	25,0	0,032	1,097	15	27,9	22,00	0,84	3,02
32	107,5	0,1301	1,65	24,85	0,01293	1,00	21	10,7	8,55	0,80	3,0
33	141,2	0,2335	0,906	50,66	0,01166	1,036	15	6,85	5,07	0,82	2,93

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
34	151,3	0,2475	0,9075	43,1	0,01203	1,037	21	7,11	5,50	0,77	2,96
35	221,0	0,2942	0,89	44,06	0,0114	1,025	12	8,72	6,00	0,78	2,78
36	234,0	0,100	7,76	25,0	0,01572	1,047	15	35,2	27,5	0,84	2,90
37	248,0	0,1983	1,65	788,0	0,01271	1,00	57	15,9	12,5	0,83	2,83
38	278,4	0,2119	1,65	157,2	0,01271	1,00	24	16,72	13,2	0,79	2,80
39	282,0	0,100	7,76	25,0	0,0189	2,874	15	18,6	14,7	0,84	2,85
40	312	0,227	1,65	150,0	0,0129	1,00	49	17,6	—	—	—
41	359,0	0,2426	1,65	156,32	0,01271	1,00	21	19,0	14,5	0,76	2,75
42	405,0	0,264	1,65	138,6	0,0128	1,00	42,6	19,6	15,9	—	2,80
43	447,0	0,100	7,76	39,42	0,00894	1,00	15	40,0	32,0	0,80	2,73
44	473,0	0,2897	1,65	824,46	0,01271	1,00	39	20,8	16,6	0,90	2,72
45	525,0	0,1225	11,0	67,14	0,01288	1,00	13	55,2	48,0	0,87	2,65
46	945,0	0,2005	7,54	724,57	0,01293	1,00	25	60,7	48,0	0,79	2,65
47	2960,0	0,3500	11,0	865,3	0,01293	1,00	15	108,0	84,0	0,77	2,62

Примечания к табл. 4. Re — отнесено к свободно падающей частице; расчетные значения C_0 определены по способу Лященко и на рисунках представлены треугольниками (рис. 8 и др.); экспериментальное значение C_0 определено графически, как это показано на рис. 8 и др.; значение K уравнения (1) определяется как соотношение этих двух C_0 ; значение n уравнения (1) определяется наклоном прямой в координатах $\lg C_0 - \lg m$.

На рисунках 9, 10, 11 и 12, эти же серии опытов показаны в координатах $\lg C - \lg m$.

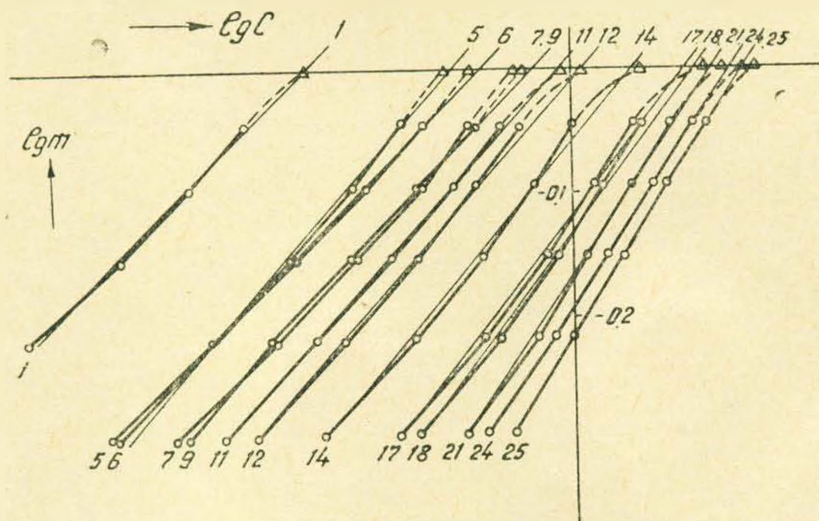


Рис. 9.

Обработка результатов исследования

Как было указано, почти все формулы, предложенные за последние годы для определения скорости стесненного падения, могут быть приведены к виду (1).

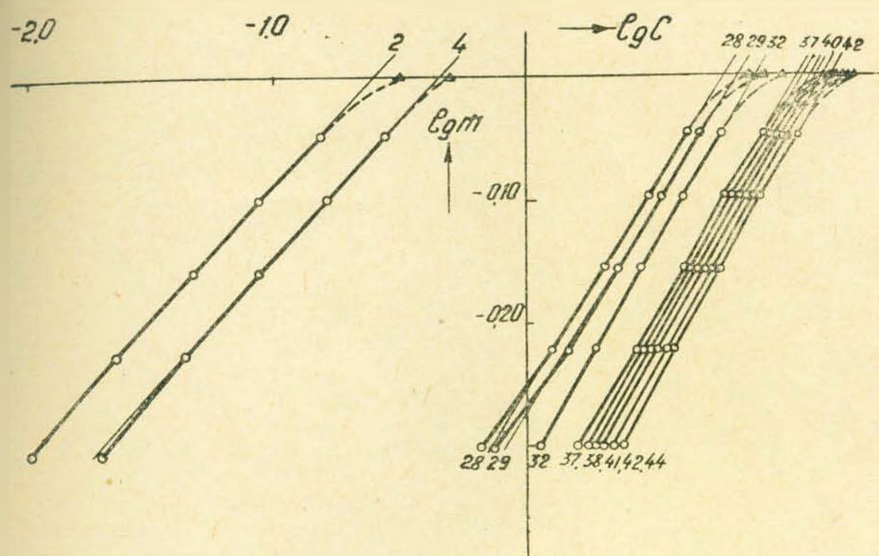


Рис. 10.

Эта формула взаимосвязи является достаточно простой, но она становится еще понятней, если коэффициент K приравнять единице, т. е. когда

$$C = C_0 m^n. \quad (2)$$

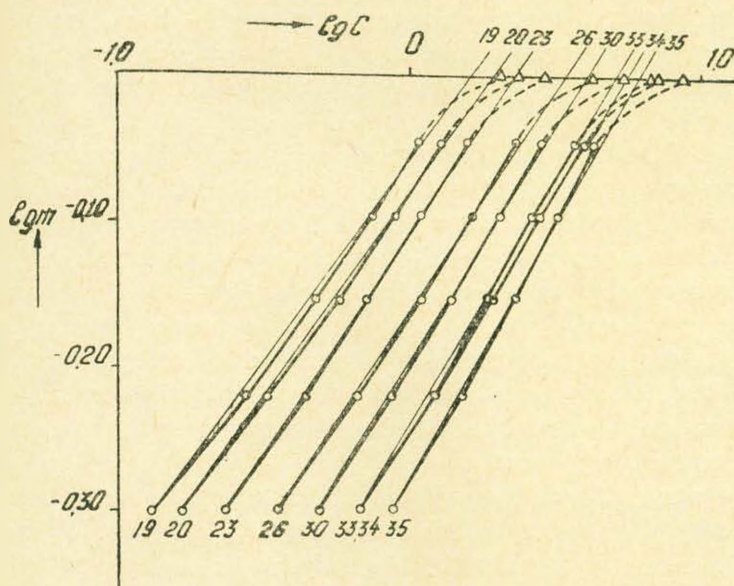


Рис. 11.

Недостаток уравнения (1) заключается в том, что его нельзя применить для случаев, когда значение m близко к единице или равно единице. Получается, что $C = K C_0$, что, очевидно, нелогично, если $K \neq 1$.

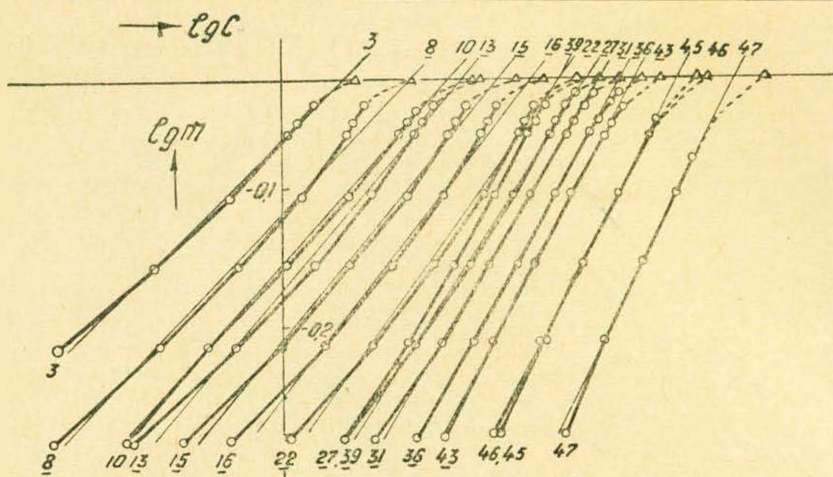


Рис. 12.

Уравнение (1) или (2) удобны для проверки и выяснения степени справедливости всех тех уравнений, которые могут быть приведены в такой вид. Мы, например, ранее [3] наш начальный опытный материал подвергли графической обработке в координатах $\lg \beta - \lg \frac{C \delta p}{m p}$. В этих координатах экспериментальные точки хорошо ложатся на одной прямой, которая удовлетворительно близко проходит через точку, соответствующую C_0 , т. е. через точку $\lg Re$. Но когда тот же опытный материал обрабатывается в координатах $\lg C - \lg m$, тогда в большинстве случаев и прямолинейность расположения точек и прохождение линии через точку, соответствующую C_0 , становятся явно неудовлетворительными.

Л. Н. Еркова и Н. И. Смирнов [5] свой опытный материал подвергли графической обработке в координатах $Re' - Arm^3$.

Такая обработка хороша тем, что сразу получается общая усредняющая кривая для всех серий опытов, но при этом отдельные детали и отклонения затушевываются и становятся незаметными. Между тем в стадии поисков возможно точных взаимосвязей и влияющих на процесс факторов эти детали и отклонения могут оказаться важными. В этих координатах можно также обрабатывать отдельно каждую серию опытов, но при этом становится чувствительной громоздкость необходимых расчетов.

Для ясности приводится рис. 13 на котором изображен пример графической обработки опытов серии № 16 (табл. 4) в указанных трех системах координат. Из рисунка видно, что в случае „а“ все экспериментальные точки вместе с расчетной точкой, соответствующей C_0 , достаточно хорошо ложатся на одной прямой. В случаях же „б“ и „в“ ясно видно, что экспериментальные точки не составляют прямую, а расчетная точка, соответствующая C_0 , резко отодвинута вправо. На основании изложенного, опытный материал обработан в координатах $\lg C$ и $\lg m$.

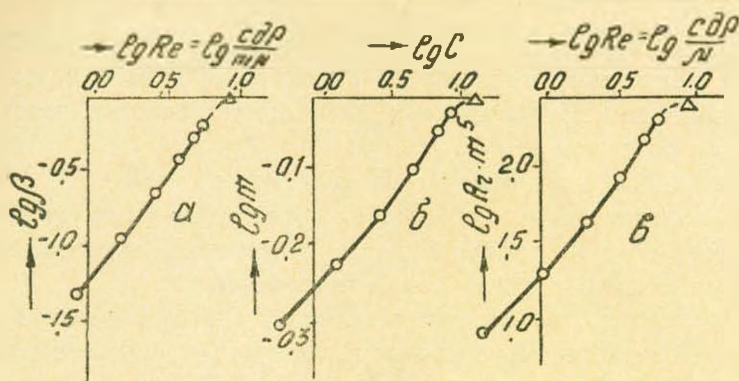


Рис. 13.

На рисунках 9, 10, 11 и 12 опытные точки отмечены кружками и соединены между собой жирными сплошными линиями. Треугольниками отмечены точки, соответствующие расчетным значениям C_0 . Жирным пунктиром проведены участки ориентировочной интерполяции. Тонкой сплошной линией проведена усредняющая прямая, при помощи которой и определено среднее значение n и значение экстраполированной C_0 . Номерация линий соответствует номерам серии опытов.

Какие предположения и выводы можно сделать из этих рисунков?

Рис. 9 изображает серии опытов по взвешиванию стеклянных шариков. Эти шарики вполне гомогенны по плотности и имеют почти идеальную шарообразную форму, но они недостаточно монодисперсны (табл. 2). Как было указано ранее [4], немонодисперсность должна привести к некоторой выпуклости линии вправо. Кроме того, это должно привести к уменьшенным значениям C_0 , определяемым экстраполяцией. Оба эти явления имеют место в большинстве случаев на рис. 9. Однако расхождения от прямой линии настолько велики, что они не могут быть объяснены только немонодисперсностью, в особенности для серий №№ 12, 14, 17, 18 и 21.

На рис. 12 изображены опыты по взвешиванию металлических шариков. Большинство опытов, т. е. 10 серий из 15-ти, касаются стальных шариков, которые по сферичности, монодисперсности и плотности явились почти идеальными и наилучшими из всех примененных нами шариков. Номера линий этих шариков подчеркнуты. Мы видим, что большинство линий стальных шариков отходят от прямой, что нельзя объяснить немонодисперсностью или другими недостатками испытуемого материала.

На рис. 10 и 11 приведены опыты по взвешиванию алюмосиликатных и парафиновых шариков. Линии по форме такие же, как и на предыдущих рисунках, только отход от прямой выражен менее рельефно. Нужно указать, что эти шарики уступают стальным шарикам и по совершенству формы и по монодисперсности и гомогенности. Как

уже указывалось, алюмосиликатные шарики мелкопористы. Эти недостатки не могут так или иначе повлиять на эксперименты, поэтому мы наибольшее предпочтение отдаем опытам со стальными шариками, а затем со стеклянными.

На всех рисунках отмечается следующее.

1. В областях малых и больших чисел Рейнольдса (соответствующих ламинарному и турбулентному движениям) экспериментальные точки сравнительно хорошо ложатся на прямую.

2. Кроме того, в области малых чисел Рейнольдса эта прямая достаточно удовлетворительно проходит через точку, соответствующую C_{10} .

3. В области средних значений числа Рейнольдса (примерно от 0,5 до 500) экспериментальные точки явно и часто резко отходят от прямой линии, показывая тем самым, что уравнение типа (1), где показатель n считается постоянным (для данной серии), не отражает действительной закономерности.

4. Если все же по экспериментальным точкам провести усредняющие прямые (тонкие линии на рисунках), то в переходной области с увеличением Re увеличивается уклон этих усредняющих прямых, т. е. уменьшается степень n .

По значениям n и Re , приведенных в табл. 4 составлен рис. 14.

Точки, соответствующие стальным шарикам, отмечены сплошными черными кружками. Согласно проведенной усредняющей линии,

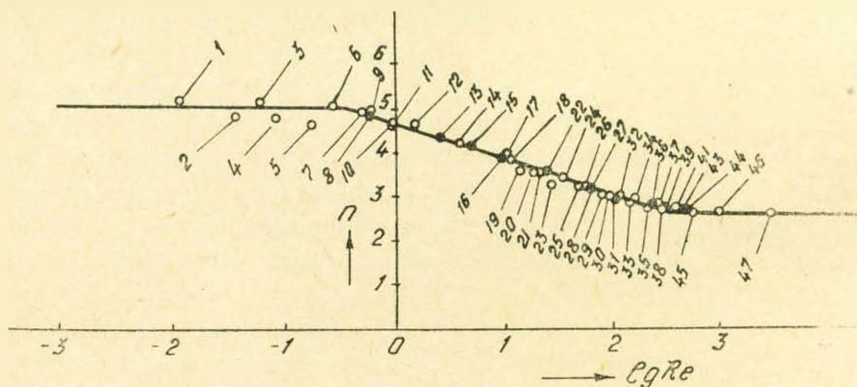


Рис. 14.

вся область (от числа Рейнольдса 0,0126 до 2960) делится на три участка: ламинарная область со значением числа Рейнольдса до $\sim 0,5$. Переходная область со значением числа Рейнольдса ~ 500 и турбулентная область, причем имеем следующие значения степени n :

1. Для ламинарной области: $n = 5,0$.

2. Для переходной области:

$$n = 4,65 - 0,78 \lg Re. \quad (3)$$

3. Для турбулентной области: $n = 2,65$.

В результате многочисленных поверочных расчетов нами, для уравнения (1), были выбраны следующие значения K : для ламинарной области — 1, а для переходной и турбулентной областей — 0,8. Это значение несколько меньше среднеарифметического значения K в табл. 4 (что составляет 0,84), но оно дает, при вышеприведенных значениях n , результаты, более близкие к экспериментальным.

Таким образом, как приближенные [5], но наиболее достоверные в настоящее время могут быть предложены следующие формулы для определения скорости стесненного падения монодисперсных шарообразных частиц:

1. Ламинарная область: $Re < 0,5$

$$C = C_0 m^5. \quad (4)$$

2. Переходная область: $0,5 < Re < 500$

$$C_0 = 0,8 C_0 m^n, \quad (5)$$

3. Турбулентная область: $Re > 500$

$$C_0 = 0,8 G_0 m^{2,65}. \quad (6)$$

Для оценки точности предлагаемых формул были рассчитаны значения C при m от 0,5 до 0,9 для всех 47 серий опытов и сравнены с экспериментальными данными. С учетом исправлений, вследствие влияния диаметра колонки на некоторые опыты, почти все отклонения находятся в пределах $\pm 10\%$.

Принятые обозначения

C — скорость стесненного падения частиц;

C_0 — скорость свободного падения частиц;

$\beta = C : C_0$ — относительная скорость стесненного падения;

φ — объемная доля твердой фазы во взвеси;

$m = 1 - \varphi$ — пористость (объемная доля среды во взвеси);

d — диаметр частицы;

ρ — плотность среды;

ρ_1 — плотность частиц;

μ — вязкость среды;

D — диаметр колонки расширения;

α — степень монодисперсности (соотношение диаметров наибольших и наименьших частиц в данной среде).

$Re = \frac{C_0 d \rho}{\mu}$ — число Рейнольдса, отнесенное к свободно падающей частице;

$Re' = \frac{C d \rho}{\mu}$ — число Рейнольдса, отнесенное к стесненно падающей частице;

$Ar = \frac{d^3 \rho (\rho_1 - \rho) g}{\mu^2}$ — критерий Архимеда.

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ, Ա. Ա. ԶԱՄԻՆՅԱՆ

ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԿԱՇԿԱՆԳՎԱՆՔ ԱՆԿՈՒՄ՝
ՄՈՆՈԴԻՍՊԵՐՍ ԳՆԴԱՋԵՎ, ՄԱՍՆԻԿՆԵՐԻ ԿԱՇԿԱՆԳՎԱՆՔ ԱՆԿՈՒՄ
(Հաղորդում 2)

Ա մ փ ո փ ու մ

Նախորդ հաղորդման մեջ [1] ցույց էր տրված, որ կաշկանդված անկումն ուսումնասիրող բոլոր հեղինակների՝ զնդաձև մասնիկների համար առաջարկված բանաձևերն ունեն (1) տեսքը, կամ բերվում են այդ տեսքին: Այնտեղ նշված էր նաև, որ այդ բանաձևերով հաշված արագությունները տալիս են մեծ շեղում, որը վերագրվում էր մեթոդիկալի որոշ անճշտություն:

Սույն հոդվածում ճշտված մեթոդիկայի [1] հիման վրա կատարված է էքսպերիմենտալ լաճն ուսումնասիրություն կախված քի հղանակով մոնոդիսպերս զնդաձև մասնիկների կաշկանդված անկման վերաբերյալ: Որպես պինդ ֆազա օգտագործվել են ապակյա զնդիկներ (նկ. 1), պարաֆինե զնդիկներ (որոնք պատրաստվել են նկ. 2-ում բերված սխեմայով), կապարե զնդիկներ, պողպատյա առանցքակալների զնդիկներ և ալյումոսիլիկատային զնդիկներ: Գրնդիկների մասին մանրամասն տվյալներ տրվում են № 2 աղյուսակում:

Որպես միջավայր օգտագործվել են, տարբեր ջերմաստիճանների (10—90° C) ջուր, գլիցերինի ջրալին լուծույթներ (20—95 °ժ գլիցերին), սոդայի լուծույթներ և բրոմֆորմ (խտությունը $\rho = 2,87$ գր./սմ.³):

Նշելով փորձերի տարրեր պալմաններից, օգտագործվել են կախված քի հղանակի իրադրման 6 տարրեր սխեմաներ (տես. նկ. նկ. 3—7): Այդ սխեմաների կիրառման միջոցով, տարրեր միջավայրում և տարբեր զնդաձև մասնիկների հետ կատարվել են 47 փորձերի սերիաներ, որոնք ընդգրկել են ավելի քան 2500 կաշկանդված անկման արագություն չափումներ: Փորձերի տվյալները ամփոփված են № 4 աղյուսակում: Ամփոփիչ բանաձևեր ստանալու նպատակով, այդ տվյալները մշակված են lgC և lgm կոորդինատներում, որտեղ՝ C -կաշկանդված անկման արագությունն է, իսկ m -կախված քի ծակրակներությունն է:

Մոնոդիսպերս զնդաձև մասնիկների կաշկանդված անկման համար առաջարկված բանաձևերի (4), (5), (6) ճշտությունը հանդիսանում է ± 10 %:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Гаспарян А. М. и Заминян А. А. «Известия АН Армянской ССР», (серия технических наук), т. XII, № 4, 1959.¹
- 2—5. Гаспарян А. М. и Заминян А. А. ДАН Армянской ССР: 2, т. XXIII, № 1, 1956; 3, т. XXIII, № 2, 1956; 4, т. XXV, № 4, 1957; 5, т. XXVI, № 1, 1958.
6. Еркova А. Н. и Смирнова Н. И. ЖПХ, т. XXIX, 1175.