

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. Гаспарян и А. А. Заминан

О механизме падения частиц в вязкой среде

(Представлено Н. Х. Арутюняном 5.VII.1957)

В литературе рассматриваются два случая падения частиц в вязкой среде: свободное падение одиночной частицы и стесненное падение. Считается, что любое совместное падение частиц, если при этом они влияют друг на друга, является стесненным, т. е. замедленным по сравнению со свободным падением.

В настоящем сообщении делается попытка выяснить этот механизм и некоторые вытекающие из него последствия.

Нам кажется, что картина падения одиночной частицы в вертикальной трубке может быть представлена согласно рис. 1. Частица, падая в вязкой неподвижной среде, увлекает с собой некоторое количество среды (рис. 1, а). При ламинарном режиме толщина увле-

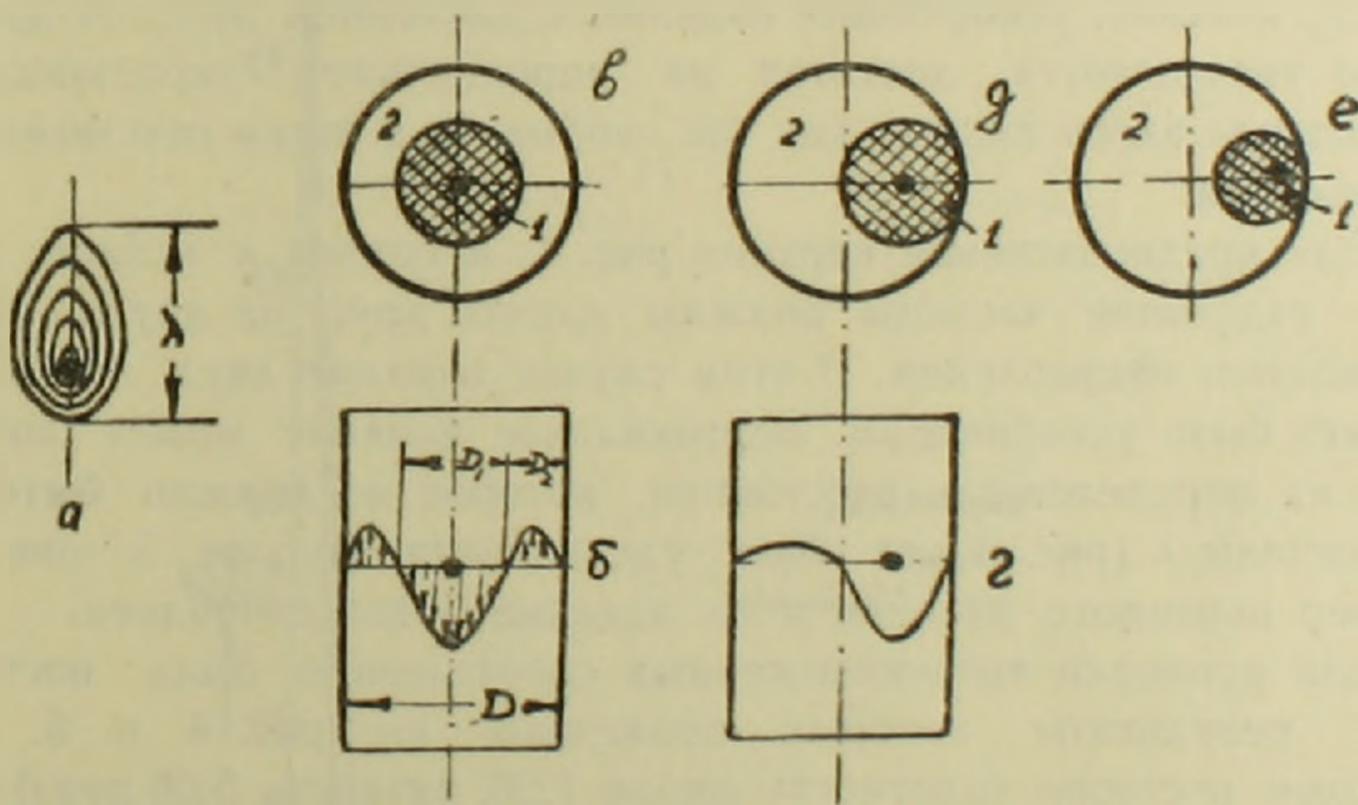


Рис. 1.

каемого слоя может достигнуть очень значительных размеров, она зависит также от диаметра трубки, в которой имеет место процесс. Если частица падает по оси трубки, то в каждый данный момент вокруг частицы возникает перемещение среды по всему сечению трубки, по схеме рис. 1, в. По заштрихованному сечению 1 среда увле-

кается вниз, а по кольцевому сечению 2 соответствующий объем среды поднимается вверх. С изменением диаметра трубки D меняются также D_1 и D_2 . Очевидно, что вес частицы G (с учетом закона Архимеда) компенсируется трением, возникающим вокруг частицы (сила трения G_1) и в кольцевом пространстве (сила трения G_2). При достаточно большом D градиент скорости в D_2 ничтожен и потому G_2 , по сравнению с G , очень мал, т. е. нет влияния стенок, сила трения $G_1 = G$. Имеет место свободное падение, когда вся сила тяжести тратится на преодоление сил трения вокруг частицы.

Если частица падает не по оси трубки, то влияние стенок зависит от расстояния последних до падающей частицы. Вероятно, что это влияние появится при положении, показанном на рис. 1, *г* и 1, *д*. При сравнительно больших D (следовательно и D_1) влияние стенок может появиться только после еще большего приближения частицы к стенке, как это указано на рис. 1, *е*.

Если частица 1 (рис. 2) падает в достаточно широкой трубке, то, согласно уже изложенным соображениям, профиль возникающих скоростей среды примерно определится кривой 1. Если бы в отсутствие частицы 1 отдельно имело бы место падение точно такой же частицы 2, то профиль скоростей в этом случае изображался бы кривой 2. Не трудно понять, что при одновременном падении обеих частиц в случае *а* взаимовлияние приведет к ускорению падения обеих частиц, а в случае *б* это взаимовлияние должно быть тормозящим, приводящим к замедлению падения.

Чем ближе частицы друг от друга, тем сильнее должно быть взаимное влияние, ускоряющее падение. С удалением друг от друга это влияние уменьшается, достигая на определенном расстоянии нуля. (обе частицы здесь падают как бы свободно), а затем оно может стать замедляющим.

Если предполагаемая картина рис. 1, *а* близка к истине, то совместно падающие частицы должны влиять друг на друга также в вертикальном направлении. В этом случае влияние двух частиц только может быть ускоряющим. Вертикальное влияние может возникать только на определенном расстоянии, которое не должно быть больше величины λ (рис. 1, *а*). При удаленности больше λ они будут вне сфер взаимного влияния и их падение будет свободное.

Для проверки вышеизложенных соображений были поставлены опыты, результаты которых приведены на рис. 4 и 5. В глицериновом растворе (плотность около 1,26, вязкость 5,06 пуаз) в трубках с диаметром 80 и 38,7 мм измерялись скорость падения отдельной частицы по центру трубок и скорости совместного падения двух точно таких же частиц в различной комбинации. В качестве частиц использовались стальные шарики с плотностью 7,76 и диаметром точно 1 мм. Обозначения на рисунках: C_0 — скорость одиночно падающей частицы, C — скорость совместно падающих двух частиц, l — расстояние между частицами по горизонтали и h — то же по вертикали.

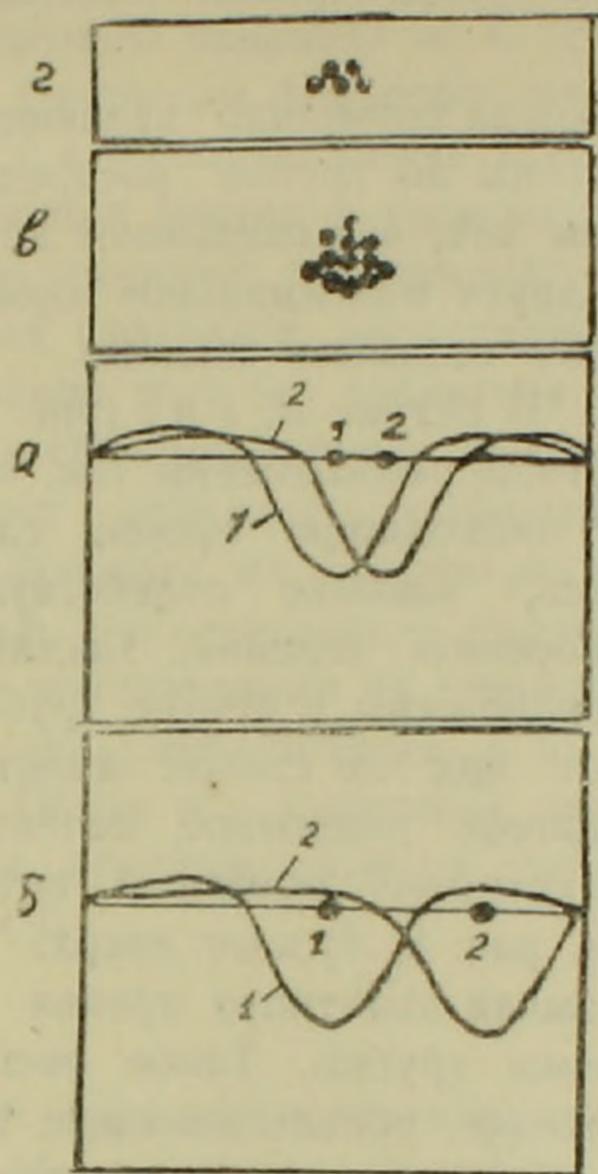


Рис. 2.

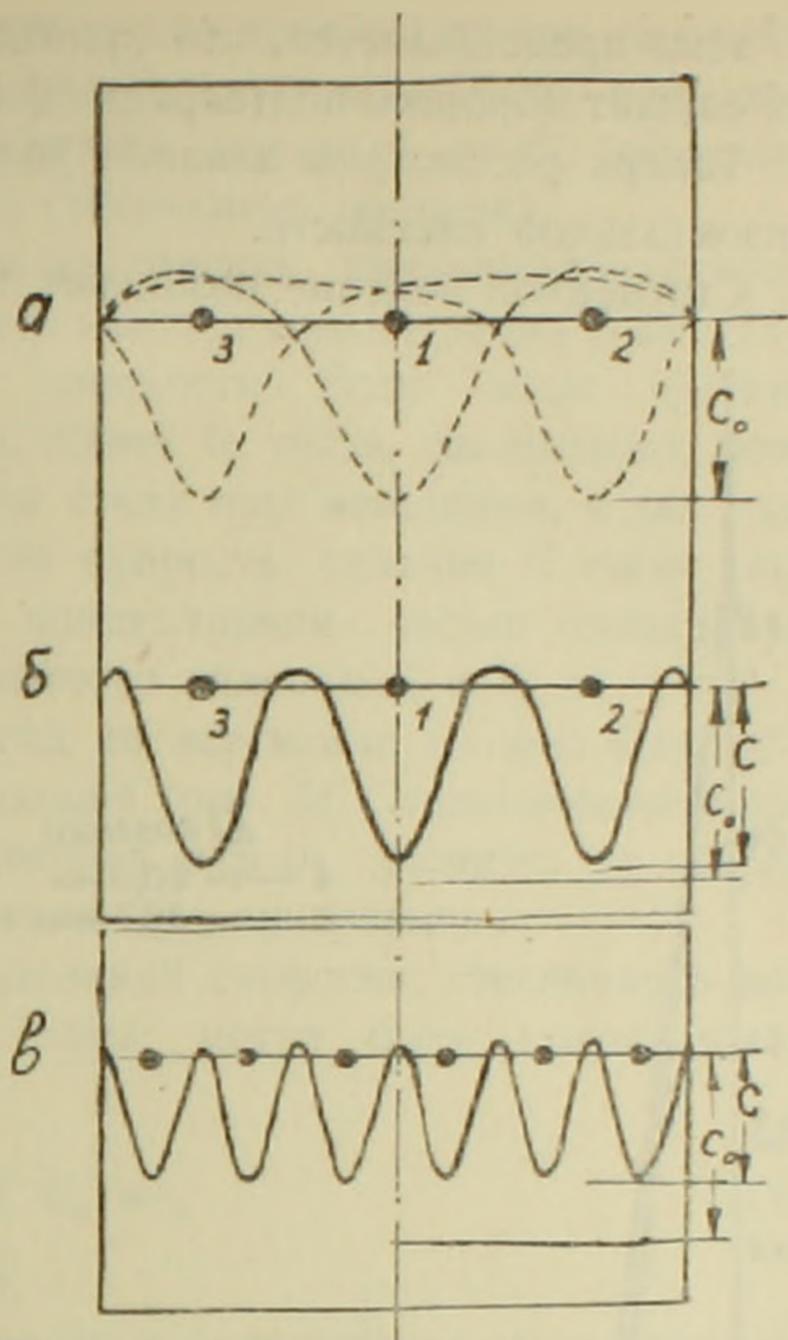


Рис. 3.

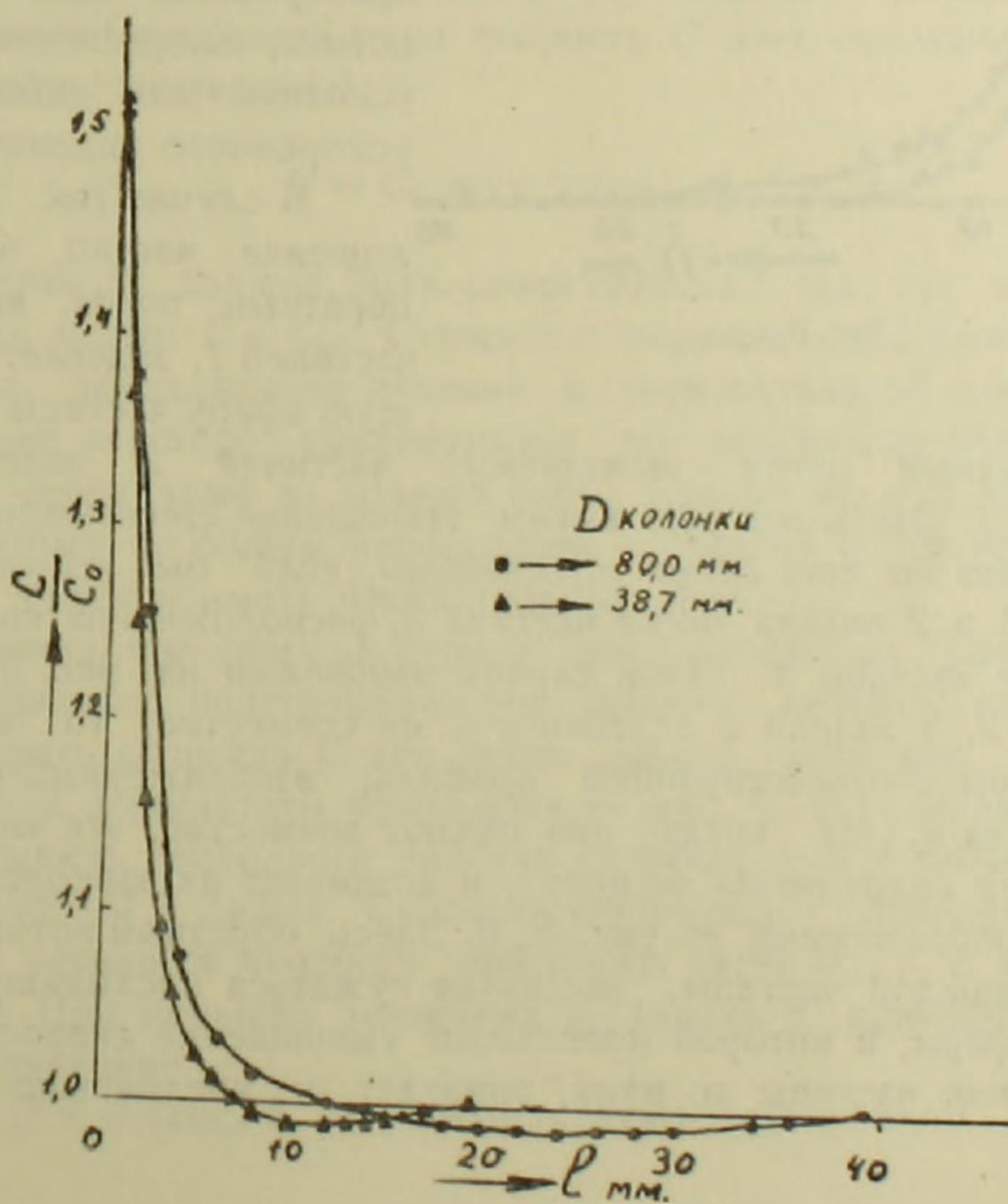


Рис. 4.

Нам представляется, что приведенный экспериментальный материал служит хорошим подтверждением изложенных выше соображений.

Теперь рассмотрим влияние увеличения концентрации частиц в горизонтальной плоскости.

Стесненное падение возникает тогда, когда совместно падающие частицы по трубке распределены так, что оказывают друг на друга максимальное тормозящее взаимное влияние.

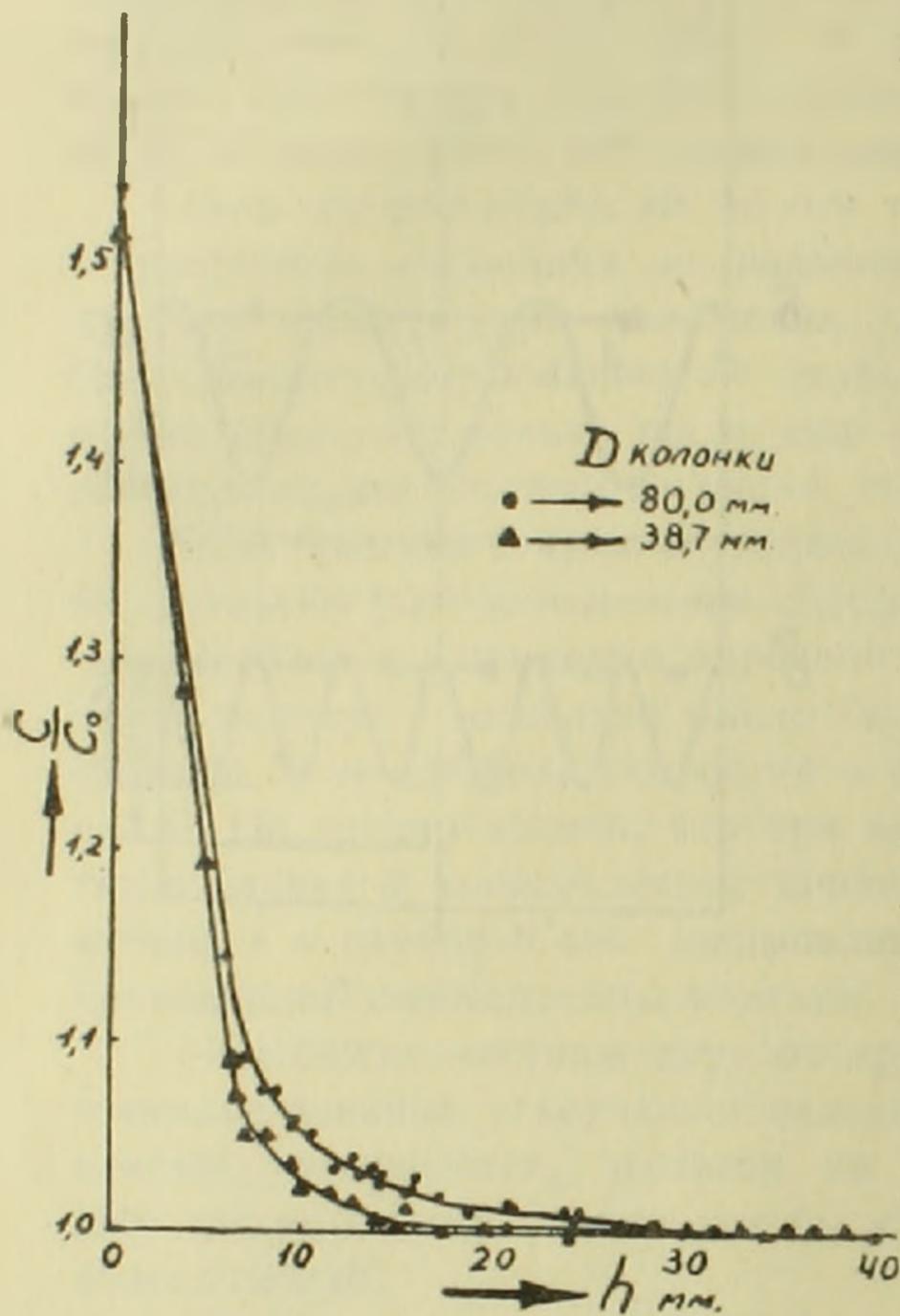


Рис. 5.

В случае *a*, *в* и *г* (рис. 2) частицы расположены так, что их нисходящие сферы, сливаясь, взаимно содействуют ускорению падения. Частицы расположены в центре трубки и от них до стенок имеется широкое кольцевое сечение, по которому обратный поток (см. рис. 1, б) идет вверх, не вызывая заметного трения об стенки трубки. Такое расположение, обеспечивающее наличие свободного от частиц пространства для обратного потока, является необходимым условием для возникновения ускоренного падения.

В случае рис. 2, б расположение частиц таково, что обратный поток, вызываемый частицей 1, задевает нисходящую сферу частицы 2, и точно

также обратный поток, вызываемый частицей 2, задевает сферу частицы 1. Здесь мы уже имеем проявление стесненного падения. Падение было бы еще более стесненным, если бы одновременно с частицами 1 и 2 падала также частица 3, расположенная симметрично и налево от частицы 1. Такой случай изображен на рис. 3. Если бы частицы 1, 2, 3 падали в отдельности, не совместно, то каждая из них имела бы соответствующий профиль, изображенный (примерно) пунктиром на *a*. Но когда они падают совместно, эти индивидуальные профили сохраняться не могут, и возникает их равнодействующий профиль, изображенный на рис. 3, б. Здесь обратный поток образуется вокруг каждой частицы, заставляя сужаться нисходящую сферу. Сужение сферы, в которой происходит уменьшение скоростей от скорости падения частицы до нуля, приведет к увеличению градиента

скорости и следовательно к возрастанию сил трения. Но так как сумма сил трения не может стать больше веса частицы G , то происходит торможение и уменьшение скорости частицы от C_0 (скорость одиночного падения) до C (скорость стесненного падения).

Основным фактором, влияющим на степень уменьшения скорости, т. е. на соотношение $C:C_0$, должна явиться концентрация совместно падающих частиц в горизонтальной плоскости. Если число частиц, расположенных по диаметру трубки, станет b , тогда, схематично, возникает картина b : нисходящие сферы стали еще меньшими, и для сохранения того же градиента скорости скорость падения C стала еще меньшей. Дальнейшее увеличение концентрации частиц приведет к новому уменьшению скорости стесненного падения C и т. д.

Влияние же концентрации частиц по вертикали должно быть обратное, увеличивающее скорость падения (рис. 5). Следовательно влияние концентрации на скорость падающей взвеси двойное: по горизонтали — уменьшающее, а по вертикали — увеличивающее.

Почти все уравнения для определения скорости стесненного падения, предложенные за последние годы, могут быть приведены к виду⁽¹⁾:

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

где m пористость взвешенного слоя.

На основании обработки обширного экспериментального материала было отмечено⁽²⁾, что уравнение (1) является приближенным. Выявление двойного влияния m на скорость C дает основание предложить следующую взаимосвязь:

$$C = C_0 m^{n-x-y}. \quad (2)$$

Постоянная K , должна быть равна единице, так как при $m = 1$ должно иметь место: $C = C_0$. Степень x выражает действие концентрации частиц, замедляющее падение в горизонтальной плоскости, а y — ускоряющее действие концентрации по вертикали. Эти величины в общем переменные и, должно быть, зависят от m и числа Рейнольдса. Поэтому в общем непостоянна и степень n . Более того, n может стать нулем и иметь отрицательный знак.

Нам удалось при помощи строго монодисперсных сферических частиц и специально сконструированной колонки методом взвешенного слоя измерять скорость C для очень малых значений объемной концентрации φ . Результаты приведены на рис. 6. В условиях опыта расчетная скорость свободного падения составляла 37,4 см/сек., а экспериментально — 37,7 см/сек. Скорость совместного падения частиц при $\varphi = 0,012$ равняется скорости свободного падения, т. е. в уравнении (2) $n = 0$. При меньших значениях φ степень n приобретает отрицательное значение.

Прямые 2 и 3 (рис. 6, б) соответствуют уравнениям типа (1).

предложенным Е. Люнсом (2), Л. Н. Ерковой и Н. И. Смирновым (1). Линия 1 представляет экспериментальную кривую, рис. 6, а.

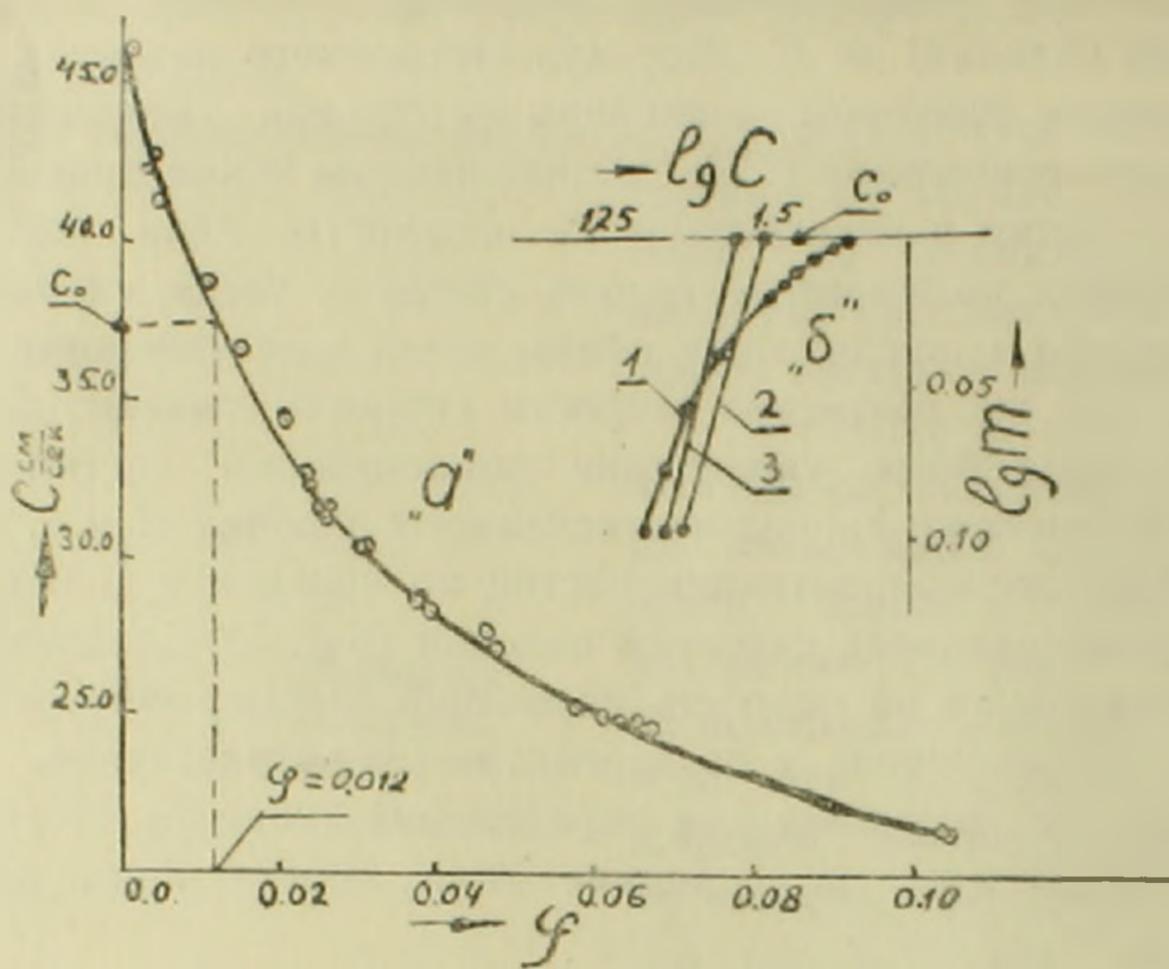


Рис. 6.

Кроме указанных выше экспериментов, было осуществлено групповое падение строго монодисперсных шариков в неподвижном глицерине. При установившемся режиме взвесь этих частиц с $\varphi = 0,000845$ имела скорость падения $C = 1,106$ см/сек. В тех же условиях скорость падения одиночной частицы в центре трубки составляла $C_0 = 0,92$ см/сек.

Отметим еще следующее. Пусть в трубку, заполненную жидкостью (рис. 7), опускаем ком, состоящий из многочисленных частиц. Он, пока не рассыпался, будет падать как одно тело. Хотя он пористый, но через его поры не пройдет (или почти не пройдет) обратный поток. Этот поток пройдет через свободное кольцевое сечение. Ком будет падать со скоростью, намного превышающей скорость свободного падения отдельной частицы. Допустим, что этот ком постепенно рассыпается на составляющие отдельные частицы, и возникает картина б. Здесь, хотя все частицы падают отдельно, вся группа пока движется по центру трубки и вокруг имеется еще свободное от частиц кольцевое пространство. Движение этой группы будет медленнее, чем кома, но все же ускоренное. Обратный поток в основном пройдет через свободное кольцевое сечение.

Через некоторый промежуток времени в трубке возникает картина в, когда частицы занимают уже все сечение трубки, но их концентрация еще неравномерна, в центре взвесь плотнее, чем на периферии. Средняя скорость падения такой взвеси может быть еще ускоренной, может равняться и скорости свободного падения отдельной частицы, и может быть меньше последней, т. е. частично стесненной — в зависимости от степени неравномерности концентрации частиц.

Такое падение, конечно переходящее, неустойчивое, которое, однако, может просуществовать в течение определенного времени и занимать определенную высоту колонки или аппарата.

Подлинное стесненное падение может наступить тогда, когда частицы заполнят все сечение колонки в виде гомогенной взвеси (рис. 7, з).

Резюмируя изложенное, можно сказать: 1) представление о том, что всякое групповое падение частиц в среде является стесненным — ошибочно; 2) подлинное стесненное падение наступает при условии: а) когда частицы заполняют все сечение среды в виде гомогенной взвеси (рис. 7, з) и б) когда замедляющее действие концентрации взвеси больше ее ускоряющего действия; 3) при малых значениях φ или больших значениях m групповое падение становится ускоренным; ускоренное движение может возникнуть также при негомогенности взвеси; 4) уравнения типа (1) являются неточными даже для строго монодисперсных частиц, так как не учитывают двойности влияния пористости на скорость падения. Полагается, что закономерности группового падения более точно выражаются уравнением типа (2). Нахождение значений x и y в зависимости от влияющих на них факторов является задачей дальнейших исследований.

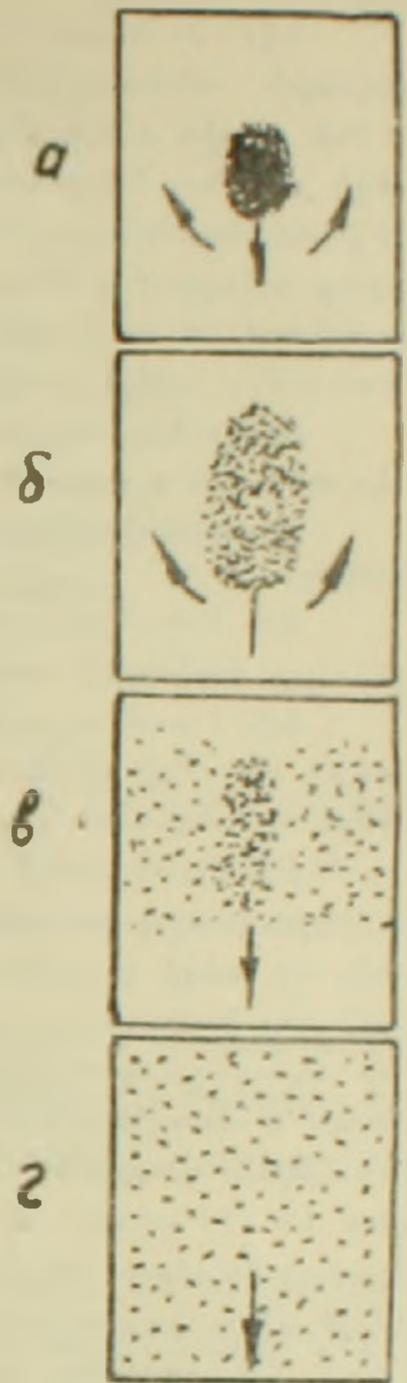


Рис. 7.

Химический институт
Академии наук Армянской ССР

Ա. Մ. ԳՍԱԳԱՐՅԱՆ ԵՎ Ա. Ա. ԶԱՄԻՆՅԱՆ

Մասնիկների անկումի մեխանիզմի մասին մտածուցիկ միջավայրում

Իրոյություն ունի համոզմունք, որ մասնիկների ամեն մի համատեղ անկում հանդիսանում է կաշկանդված, այսինքն դանդաղեցված: Այս հաղորդման մեջ փորձ է արված որոշ պարզեցում մտղնել համատեղ անկման մեխանիզմի մեջ և հանդիման է որոշ նոր կորակացությունների:

Նկ. 1-ը ցույց է տալիս հորիզոնական հարթության մեջ իրարից 1 հեռավորության վրա դանդաղ և համատեղ ընկնող երկու մասնիկների փոխազդեցությունն իրար վրա: Նկ. 2-ում արված է նույնը, երբ երկու մասնիկներ համատեղ ընկնում են ուղղաձիգ հարթության մեջ իրարից 11 հեռավորության վրա: Այդ փաստերի հիման վրա արված է անկման ենթադրյալ պատկերը, ըստ որի առանձին ընկնող մասնիկը (նկ. 1) իր հետ տանում է հեղուկի որոշ ծավալ δ , որի մեջ հեղուկի շերտերի արագությունը դեպի ներքե փոփոխվում է C_0 -ից մինչև զերու δ և z ցույց են տալիս սահմանային շարժումների պրո-

Ֆիլները: նկ. 2, a-ն ցույց է տալիս համատեղ անկման այն դեպքը, երբ փոխադրեցությունը բերում է անկման արագացման, իսկ նկ. 2, b-ն ցույց է տալիս անկման դանդաղեցման դեպքը:

Նկ. 3, a-ում սխեմատիկորեն ցույց են տրված համատեղ ընկնող երեք մասնիկների անհատական պրոֆիլները, իսկ նկ. 3, b-ում նրանց դումարը: Նկ. 3, b-ն տալիս է նույն սխեման 6 մասնիկների համար: Այս բոլոր դեպքերում պետք է տեղի ունենա համատեղ անկման C արագության նվազում՝ ազատ անկման C_0 արագության համեմատությամբ, քանի որ, ամեն մի մասնիկի հետ ներքև տարվող հեղուկի շերտը նվազում է և արագության զրադիենտը հաստատուն սլահվելու միակ ուղին դա է: Այսպիսով, ՈՒ ծակոտկենությունն անկման հետ (հորիզոնական կտրվածքում) անկումը դառնում է ավելի կաշկանդված, այսինքն ավելի դանդաղ:

Ուղղաձիգ հարթության մեջ ընդհակառակը՝ Մ-ի փոքրացումը պետք է բերի համատեղ անկման արագության մեծացման:

Այսպիսով Մ-ի ազդեցությունը համատեղ անկման վրա և արագացնող է և դանդաղեցնող:

Նկ. 6-ում բերված են փորձնական տվյալներ պողպատյա մեկ միլիմետրանոց զրնդիկների համատեղ անկման վերաբերյալ:

Նկ. 7-ում բերված է բազմաթիվ մասնիկներից կազմված զանգվածի անկման զանազան փուլերի սխեման, որոնց ընթացքում արագությունը աստիճանաբար նվազում է, մինչև որ անկումը դառնում է իսկական կաշկանդված շ:

Այսպիսով ցույց է տրված, որ՝ 1. գոյություն ունեցող սլատկերացումն այն մասին, որ յուրաքանչյուր համատեղ անկում կաշկանդված է — սխալ է: 2. իսկական կաշկանդված անկումը տեղի է ունենում, երբ՝ ա) մասնիկները տարածվում են ամբողջ ծավալով մեկ, համասեռ կախվածքի ձևով, բ) եթե Մ-ի դանդաղեցնող ազդեցությունն ավելի մեծ է նրա արագացնող ազդեցությունից: 3. Մ-ի մեծ արժեքների դեպքում համատեղ անկումը լինում է արագացած. այդպիսի անկում կարող է առաջանալ նաև կախվածքի ոչ հոմոգենությունից: 4. շատ հեղինակների կողմից առաջարկված բանաձևերը, որոնք բերվում են (1) տեսքի, ճիշտ չեն, քանի որ հաշվի չեն առնում Մ-ի երկտեսակ ազդեցությունը: Կարծում ենք, որ միաչափ մասնիկների համատեղ անկման օրինաչափությունն ավելի ճիշտ կարտահայտի (2) տիպի հավասարումը: X-ի (դանդաղեցնող ազդեցությունը) և Y-ի (արագացնող ազդեցությունը) արժեքների որոշումը հանդիսանում է հետագա ուսումնասիրությունների առարկա:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Я. Беня, Chemické Zvesti, Slovenska Academia, с. 9 6, 374 (1955). ² А. М. Гаспарян и А. А. Заминян, ДАН АрмССР, XXV, 213 (1957). ³ Е. В. Льюис и Е. Ь. Боверман, С em. Eng. Progr., 48, 603 (1952). ⁴ Л. Н. Еркова и Н. И. Смирнов, ЖПХ, XXIX, 1175 (1956).