ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
XXV 1957 4

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. Гаспарян и А. А. Заминян

Некоторые вопросы стесненного падения частиц и методики эксперимента

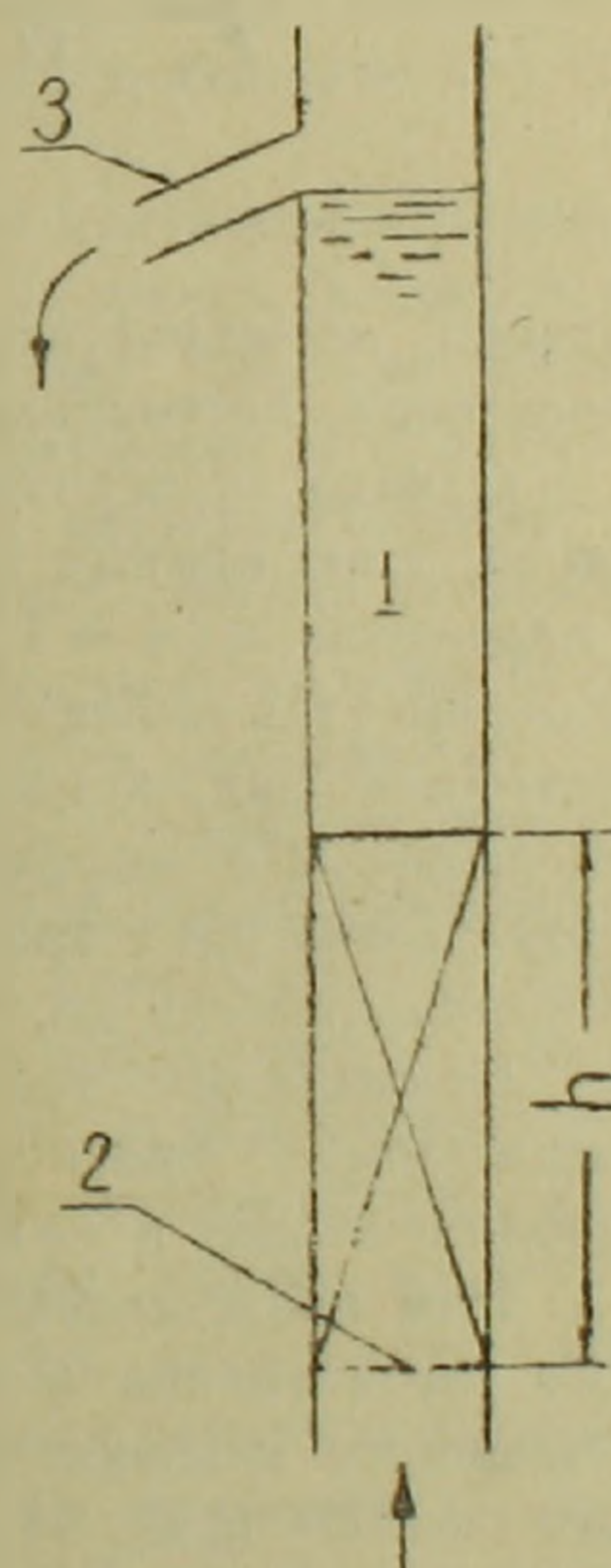
(Представлено Н. Х. Арутюняном 5. VII. 1957)

Как было указано ([1]), выяснение закономерностей стесненного падения частиц имеет важное значение для техники.

Исследования в этой области пока ведутся в направлении выяснения закономерностей стесненного падения монодисперсных сферических частиц, что является первым шагом для решения проблемы стесненного падения полидисперсных частиц, не имеющих определенной формы.

Почти все авторы для своих экспериментов используют сферические частицы узкой ситовой фракции, принимая, что эти частицы монодисперсны со средним диаметром, высчитанным для данной фракции.

Общепринятой методикой для измерения скорости стесненного падения является способ взвешенного слоя (фиг. 1). В колонку *1* кладется навеска частиц, располагающихся на сетке *2*. Потоком жидкости, подаваемом снизу, частицы переводятся во взвешенное состояние, причем каждой скорости потока соответствует определенная высота h столба взвеси и определенная объемная концентрация φ твердой фазы (для данных частиц, данной жидкости, при постоянной температуре). Жидкость из колонки отводится через патрубок *3*. С возрастанием скорости подачи жидкости увеличивается столб взвеси h и уменьшается концентрация твердых частиц φ. Принимается, что скорость стесненного падения взвеси c равна той скорости, с которой жидкость течет в свободном от взвеси сечении колонки. На фиг. 2,*a* приведен пример экспериментальной кривой $c = f(\varphi)$.

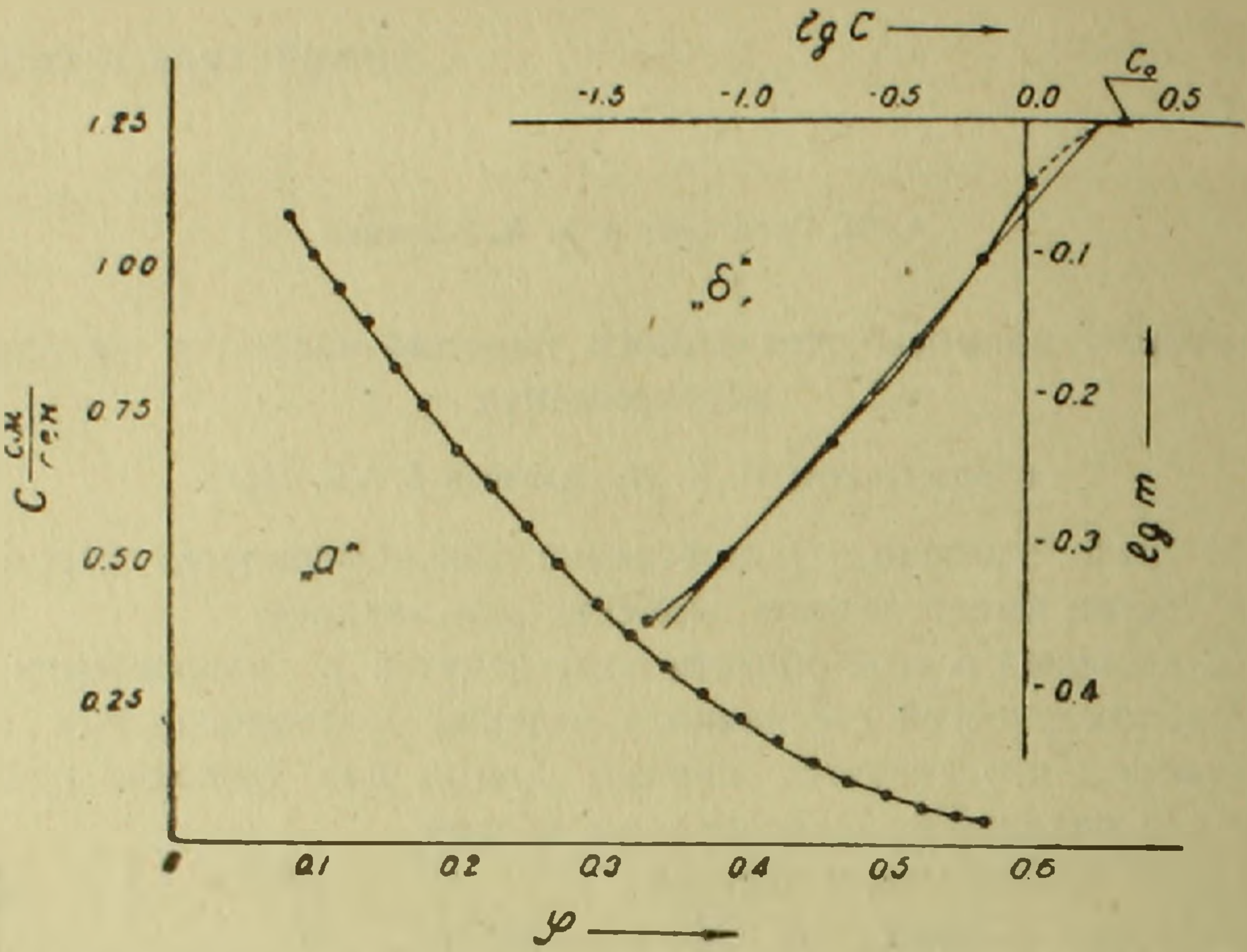


Фиг. 1.

Почти все авторы в последние годы на основании экспериментов предлагают формулу вида:

$$c = kc_0 (1 - \varphi)^n = kc_0 m^n \cdots \qquad (1)$$

Здесь: k — коэффициент, обычно меньше единицы. c_0 — скорость падения одиночной частицы в бесконечной среде — скорость свободного



Фиг. 2.

падения, m — пористость взвеси, т. е. объемная доля среды во взвеси. n — степень, постоянная для данной системы.

Однако экспериментальные значения c и m в координатах $\lg c$ и $\lg m$ не дают прямых линий, проходящих через точку с абсциссой $\lg c_0$ и ординатой $\lg (m = 1) = 0$. Обработка многочисленных результатов экспериментов (наших и других авторов) показывает, что линия $\lg c = f(\lg m)$ имеет вид, приведенный на фиг. 2, *б*. Любая прямая, проведенная на фиг. 2 и выражающая уравнение (1), явится приближенной и неохватывающей с приемлемой точностью весь диапазон m, который меняется от нуля до, примерно, 0,5.

Неизбежным является вывод о том, что уравнения типа (1), предлагаемые многими авторами (в том числе и нами[1]) являются приближенными и нуждаются в дальнейшем уточнении.

Нам представляется, что это уточнение нужно начать с подробного рассмотрения и критики самой методики измерения скорости стесненного падения. Несмотря на широкое применение вышеописанного способа (фиг. 1) в литературе отсутствует его подробное рассмотрение и только дается схематическое описание. Между тем имеется ряд факторов, которые могут в той или иной степени влиять на точность и объективность измеряемых величин. Такими факторами могут являться:

1) немонодисперсность применяемых для опыта сферических частиц;

2) деформация профиля скоростей жидкости при ее входе во взвесь. эта деформация могла бы вызвать другую концентрацию твердой фазы в нижних слоях взвеси, отличную от измеряемого среднего значения;

3) деформация профиля скоростей жидкости при ее выходе из взвеси;

4) число Рейнольдса потока жидкости;

5) диаметр колонки D, вернее соотношение диаметра колонки к диаметру частиц d. Этот вопрос в литературе рассмотрен([2]) только для одиночно падающих частиц, но совершенно не изучен для стесненного падения.

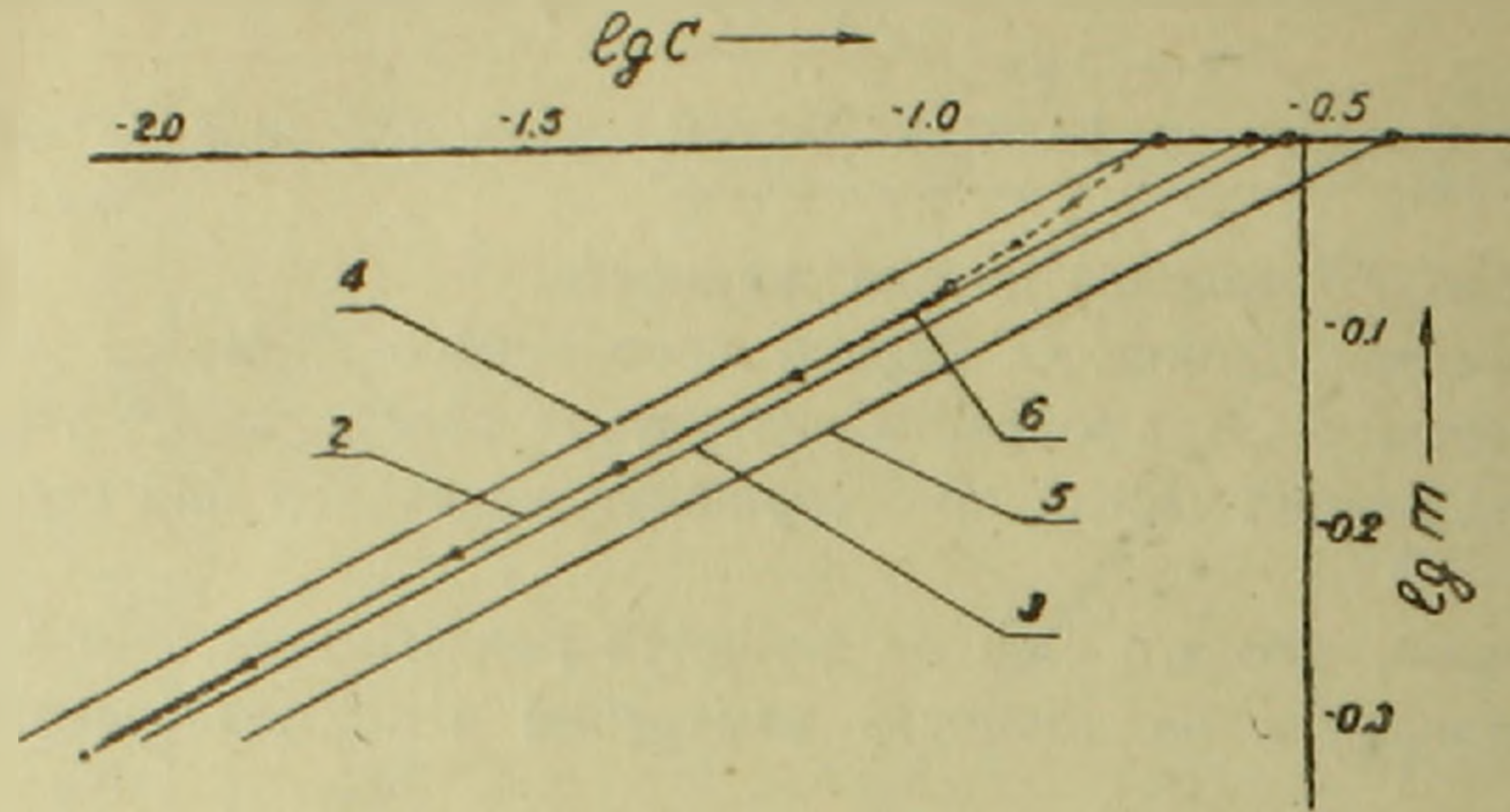
Возможно, что это еще не является полным перечнем факторов, могущих повлиять на точность измерений и не подвергшихся еще изучению.

Соответствующими исследованиями мы убедились, что факторы 2,3 и 4 не оказывают ощутимого влияния на точность методики взвешенного слоя. Фактор 5 сильно может повлиять на объективность измеряемых c и m, однако он не может изменить форму кривой фиг. 2, *б*. Немонодисперсность же частиц в ряде случаев может привести к заметным погрешностям, рассмотрению которых посвящено это сообщение.

Если частицы испытуемого и гомогенного по плотности материала неодинаковы по размерам, то при переводе их во взвесь, несмотря на хаотичность движения частиц и перемешивающее действие потока жидкости, их сепарация, хотя бы неполная, неизбежна. Пусть соотношение диаметров наикрупной и наименьшей частиц составляет α. Для ситовых фракций мелких частиц эта величина обычно равняется $\sqrt{2}$. Это означает, что при ламинарности режима крупные частицы будут иметь скорость в 2 раза превышающую скорость наименьших частиц. С увеличением числа Рейнольдса эта разница в скоростях (при той же α) уменьшается, но все же остается достаточной для возникновения частичной сепарации. Сепарация же приводит к переменности m по высоте слоя взвеси. и если уравнение (1) даже применимо к строго монодисперсным частицам, станет неточным для немонодисперсных.

Для иллюстрации приведен пример, изображенный на фиг. 3. В примере допущено, что фракция шариков состоит только из частиц $d_1 = 50\mu$ и $d_2 = 70{,}7\mu$. $\alpha = \sqrt{2}$, плотность частиц 2,5, среда—вода с вязкостью 0,01 пуаз. Весовые количества шариков обоих размеров одинаковы. На фиг. 3 приведены прямые (рассчитанные по уравнению (1), принимая $K = 1$): *4*—для частиц 50 μ, *5*—для частиц 70,7 μ и *2*—для частиц среднеобъемной величины 57 μ, прямая *3* касается частиц среднеситового размера 60,3 μ.

Но, если взвесь из смеси этих шариков полностью сепарируется, то ее поведение, т. е. взаимосвязь $c = f\ (m_{ср})$, не будет такой, какая имеет место для частиц средней величины. Исходя из допущения, что частицы, сепарируясь, образуют два самостоятельных слоя, каждый из которых в отдельности подчиняется уравнению (1), построена пунктирная кривая *6*, выражающая взаимосвязь $c = f\ (m_{ср})$.



Фиг. 3.

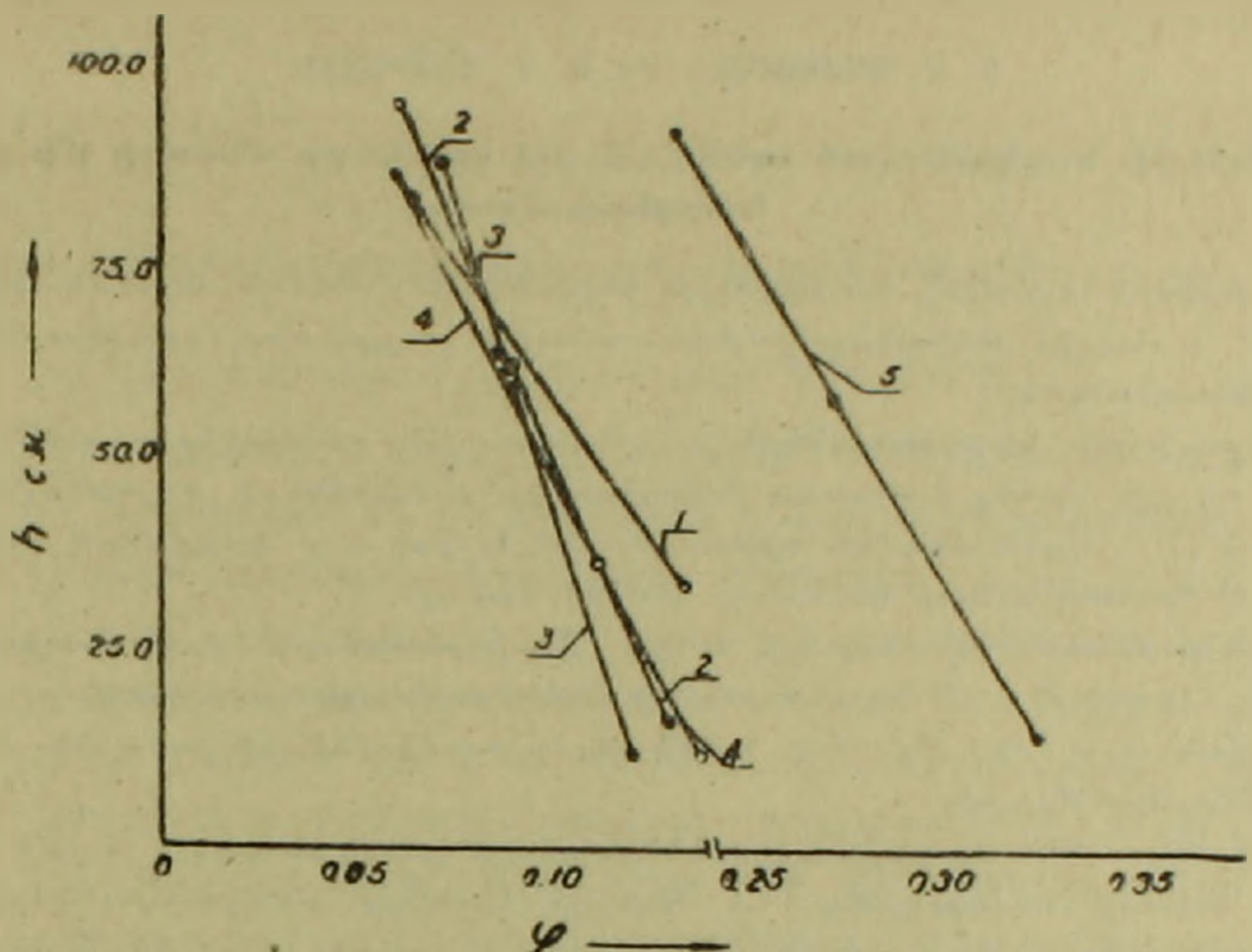
Из приведенного примера следует: если немонодисперсная смесь частиц, расширяясь в потоке жидкости, сепарируется (или себя ведет как сепарированная система), то для такой смеси невозможно найти средний диаметр частиц и применить к ней уравнение (1). Такое расширение мы называем аддитивным расширением. При аддитивности расширения взвесь себя ведет так, будто с увеличением m уменьшается средний диаметр частиц и в пределе, когда $m \to 1$, становится равным диаметру наименьших частиц.

Нами из большой партии алюмосиликатных пористых частиц были выделены почти монодисперсные шарики ($\alpha = 1{,}05 \div 1{,}10$) величиной 0,290, 0,243, 0,198, 0,130 и 0,097 *см*. Они пропитывались водой различной окраски и их смеси в различных вариантах подвергались расширению в потоке воды, в аппарате типа фиг. 1. Визуально было установлено, что ни одна из смесей не подвергалась полной сепарации, но не имело место также полное смешение. В случае близких размеров шариков во взвеси преобладал смешанный слой, и наоборот. Однако во всех случаях расчетные точки, вычисленные с учетом аддитивности расширения, совпадали с экспериментальной кривой $c = f\ (m_{ср.})$.

Эти эксперименты подсказывают вывод о том, что при немонодисперсности частиц взвеси, независимо от степени сепарации, расширение является аддитивным. Это означает: если частица малых размеров находится в окружении более крупных, то она все равно во взвеси занимает такой объем и имеет такую сферу действия, какие она имела бы в окружении подобных себе частиц, и что вызываемая данной частицей пористость m или концентрация φ в среднем не зависят от точки ее нахождения и от окружающих ее частиц.

Результаты опытов по определению степени сепарации обычных фракций частиц ($\alpha = \sqrt{2}$) при их расширении в потоке воды, по схеме фиг. 1, приведены на фиг. 4.

Как видно из рисунка, сепарация частиц по высоте слоя h очень значительна. Например, помол стекла фракции—100 + 140 меш, на высоте 16 *см* (от сетки прибора) имел концентрацию $\varphi = 0{,}133$, а на высоте 96 *см*—0,061. Средняя же концентрация всей взвеси, рассчитанная по весу загрузки и по занимаемому объему взвеси, составляла 0,101.



Фиг. 4.

1—стекл. шарики, фр. —100+140 меш ($\varphi_{cp}=0{,}115$); *2*—помол стекла, фр—100+140 меш ($\varphi_{cp}=0{,}101$); *3*—помол стекла, фр—20+30 меш ($\varphi_{cp}=0{,}101$); *4*—помол стекла, фр—30+40 меш ($\varphi_{cp}=0{,}100$); *5*—помол стекла, фр—100+140 меш ($\varphi_{cp}=0{,}298$).

На основании всего вышеизложенного можно заключить:

1) обычные ситовые фракции частиц при их расширении в потоке среды подвергаются значительной сеперации, образуя взвесь с переменной плотностью по высоте;

2) расширение таких фракций, независимо от степени сеперации, является аддитивным, и экспериментально полученную взаимосвязь $c = f(m)$ нельзя с достаточной точностью отнести к частицам среднего размера;

3) для получения достоверной картины этой взаимосвязи, для эксперимента нужно применять по возможности строго монодисперсные частицы со значением α не более 1,1. Применение же более немонодисперсных частиц, помимо указанного, вызывает затруднения и неточности в определении среднего размера и делает невозможным экспериментальное измерение скоростей падения для φ, меньших 0,1.

Однако отклонение экспериментальных точек от прямой (в координатах $\lg c$ и $\lg m$) нельзя целиком приписать неточностям, вытекающим из немонодисперсности частиц. Эти неточности в отдельных случаях даже сглаживают отклонение от прямой. Основная причина непрямолинейности выражения $\lg c = f(\lg m)$ заключается в другом явлении, о котором будет сообщено отдельно.

Химический институт
Академии наук Армянской ССР

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ ԵՎ Ա. Ա. ԶԱՄԻՆՅԱՆ

Մասնիկների կաշկանդված անկման և փորձերի մեթոդի մի քանի հարցերի մասին

Մոնոդիսպերս գնդաձև մասնիկների կաշկանդված անկման ուսումնասիրությունը հանդիսանում է հարցի ընդհանուր լուծման առաջին քայլը, որով զբաղվում են ներկայումս շատ հետազոտողներ:

Համարյա բոլոր հետազոտողներն առաջարկում են բանաձևեր, որոնք կարող են բերվել (1) տեսքի, որտեղ c*-գնդաձև մոնոդիսպերս մասնիկների կաշկանդված անկման արագությունն է,* c_0*-ազատ անկման արագությունն է, իսկ* m*-ը կախվածքի ծակոտկենությունը:* k *և* n *հաստատուններ են տվյալ ռեժիմի համար:*

Սակայն փորձնական կետերը $\lg c$ *և* $\lg m$ *կոորդինատների վրա տալիս են կոր, (նկ. 2 б) որը հակասում է (1) հավասարմանը: Հետևապես այդ հավասարումը կարիք ունի հետագա ճշտման, որը մեզ թվում է պետք սկսել փորձի մեթոդի (տես. նկ. 1) մանրամասն ուսումնասիրությունից:*

Գոյություն ունեն մի շարք գործոններ, որոնք կարող են ազդել փորձի ճշտության վրա: Մենք փորձով համոզվեցինք, որ հեղուկի հոսանքի արագությունների պրոֆիլի ձևափոխությունը (կախվածք մտնելիս և նրանից դուրս գալիս), հեղուկի հոսանքի Ռեյնոլդսի թիվը և փորձանոթի D *ու մասնիկների* d *տրամագծերի հարաբերությունը կորագծի ձևի վրա շոշափելի ազդեցություն չունեն: Սակայն կորագծի ձևի վրա զգալի ազդեցություն է թողնում փորձում օգտագործվող մասնիկների իսկապես ոչ մոնոդիսպերս, միաչափ լինելը:*

Այս հաղորդման մեջ ցույց է տրված, որ սովորական մաղային ֆրակցիաները փորձի ժամանակ ենթարկվում են մասնակի սեպարացիայի, և կախվածքի ծավալային խտությունը ըստ h *բարձրության փոփոխական է (տես նկ. 4): Արված է եզրակացություն, որ տարբեր մեծության մասնիկների խառնուրդը, անկախ սեպարացիայի աստիճանից, ընդարձակվելով հեղուկի հոսանքից, իրեն պահում է այնպես, ինչպես իրեն կպահեր լրիվ սեպարացիայի ենթարկված, առանձին ինքնուրույն շերտերի բաժանված խառնուրդը: Այդպիսի ընդարձակումն անվանված է ադիտիվ: Ցույց է տրված, որ ադիտիվ ընդարձակման դեպքում (1) բանաձևը, եթե նա նույնիսկ ճիշտ է միաչափ մասնիկների համար, դառնում է մոտավոր ոչ միաչափ մասնիկների համար (նկ. 3).*

Արված են հետևյալ եզրակացությունները.

1. Սովորական մաղային ֆրակցիաներն ընդարձակվելիս ենթարկվում են զգալի սեպարացման, կազմելով փոփոխական խտությամբ կախվածք: 2. Նրանց ընդարձակումն ադիտիվ է և փորձից ստացված $c=f(m)$ *կապակցությունը չի կարելի բավարար ճշտությամբ վերագրել միջին մեծության մասնիկներին: 3. Այդ կապակցության ճիշտ պատկերն ստանալու համար անհրաժեշտ է փորձերը կատարել միաչափ մասնիկների վրա և ոչ թե մասնիկների մաղային ֆրակցիայի վրա, որոնց դեպքում անճշտություններ են առաջանում նաև միջին տրամագիծն որոշելիս և անհնար է դառնում վստահելի փորձեր կատարել 0,1-ից ավելի փոքր խտության կախվածքների հետ:*

Սակայն փորձնական կետերի շեղումն ուղիղ գծից չի կարելի ամբողջապես վերագրել մասնիկների անմիաչափությունից բխող անճշտություններին, որոնք երբեմն նույնիսկ քչացնում են այդ շեղումը: Ուղիղ գծից շեղվելու հիմնական պատճառն ուրիշ է, որի մասին կխոսվի առանձին:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *А. М. Гаспарян* и *А. А. Заминян*, ДАН АрмССР, т. XXIII, 17 (1956). [2] *Л. Н. Еркова* и *Н. И. Смирнов*, ЖПХ, XXIX, 733, 1956.