ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՀ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР
XXXVIII 1964 3

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А. М. Гаспарян и Н. С. Икарян

О форме и гидродинамической характеристике твердых частиц

(Представлено академиком АН Армянской ССР И. В. Егиазаровым 10/XI 1963)

Гидродинамические вопросы любых процессов, осуществляемых в двухфазных системах (жидкость—твердые частицы)—взмучивание, отстаивание, гидро- и пневмотранспорт, обогащение, массообменные процессы и другие,—можно с приемлемой точностью оценить или рассчитать только при знании скорости свободного падения (осаждения) частиц или, иначе, гидравлической крупности частиц. В настоящее время известны уравнения для достаточно точного расчета этой скорости только для сферических и некоторых частиц геометрически правильной формы. Для неправильной формы (или бесформенных) частиц помолов, представляющих практический интерес, существующие уравнения и немногочисленные данные не позволяют делать какие-либо уверенные расчеты.

В литературе распространено убеждение, что гидродинамическая характеристика несферической частицы зависит и определяется ее поверхностью, вернее, величиной ψ, представляющей собой отношение поверхности эквивалентной сферы к поверхности частицы. Эта величина получила название „коэффициент сферичности", или „симплекс формы", или „шаровое число". Предложена взаимосвязь вида [1-3]:

$$U_0 = \psi^x C_0, \tag{1}$$

где U_0 — скорость свободного падения несферической частицы, а C_0 — то же самое, для эквивалентной по объему и плотности сферы, в тех же условиях. Показатель степени x колеблется в пределах от 1 до 2 в зависимости от числа Рейнольдса, а $\psi < 1$.

Влияние ψ на U_0 наиболее тщательно изучали Чаудхури и Фритц [4], используя, как и другие авторы, нешарообразные, но правильной формы частицы. Они установили, что для тетраэдра, куба и октаэдра в ламинарной области падения может быть рекомендовано уравнение:

$$U_0 = (1 + 0{,}862 \lg \psi)\, C_0. \tag{2}$$

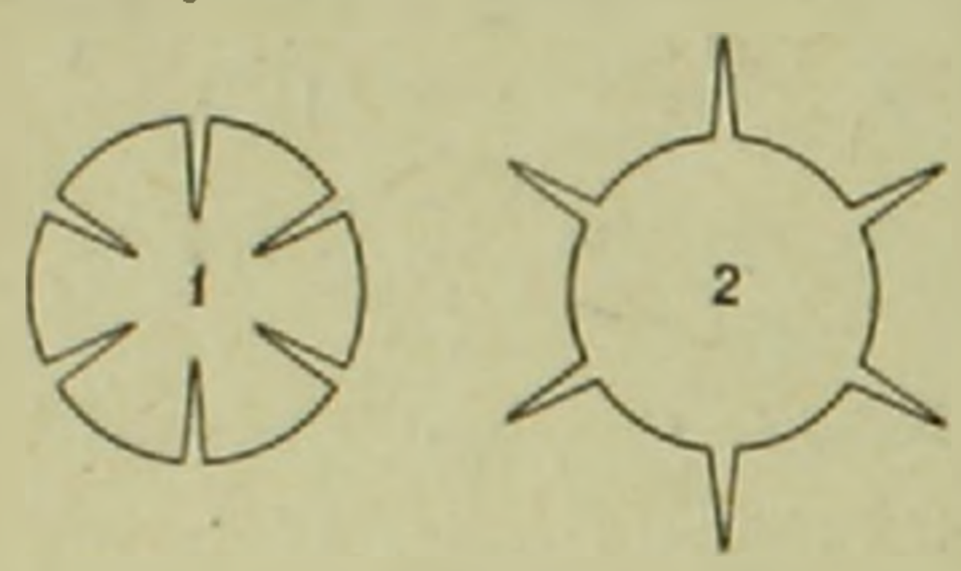
Они предложили аналогичное уравнение также для турбулентной области:

$$U_0 = (1{,}23 - 1{,}69\psi - 0{,}616\psi^2 + 2{,}06\psi^3)\,C_0. \qquad (2a)$$

Нам представляется, что уравнения типа (1) и (2), полученные эмпирически для ограниченного числа геометрически правильной формы частиц, не могут быть распространены на неправильной формы частицы помолов, на бесформенные частицы по следующим причинам.

Во-первых, невозможно с приемлемой точностью определить поверхность бесформенных частиц, без чего нельзя найти значение ψ.

Во-вторых, как нам кажется, вообще не существует однозначной связи между U_0 и ψ. Для иллюстрации сказанного рассмотрим следующий несколько утрированный пример. Пусть частица *1* (фиг. 1) представляет собой сферу, с тонкими канавками, идущими по всему периметру. У этой частицы почти такой же диаметр δ, как у эквивалентного шара, но ее поверхность намного превышает поверхности последнего. Частица *2* также представляет собой сферу, с тонкими выступами по всему периметру. Эти выступы имеют незначительный объем, но развитую поверхность. В общем поверхности и объемы этих двух частиц одинаковы, следовательно, они имеют одинаковый коэффициент ψ. Ввиду тонкости канавок и выступов диаметры шарообразной части обеих частиц почти одинаковы и равны диаметру эквивалентного шара. Согласно уравнениям (1) и (2) эти частицы должны иметь одинаковую скорость падения U_0, но, совершенно очевидно, что этого быть не может. Поверхность канавок частицы *1* почти не будет влиять на ее скорость падения, которая будет такая же, как и скорость падения эквивалентного шара C_0. Влияние же выступов частицы *2* на скорость ее падения будет очень сильное, и она будет падать, в одинаковых условиях, намного медленней частицы *1*.

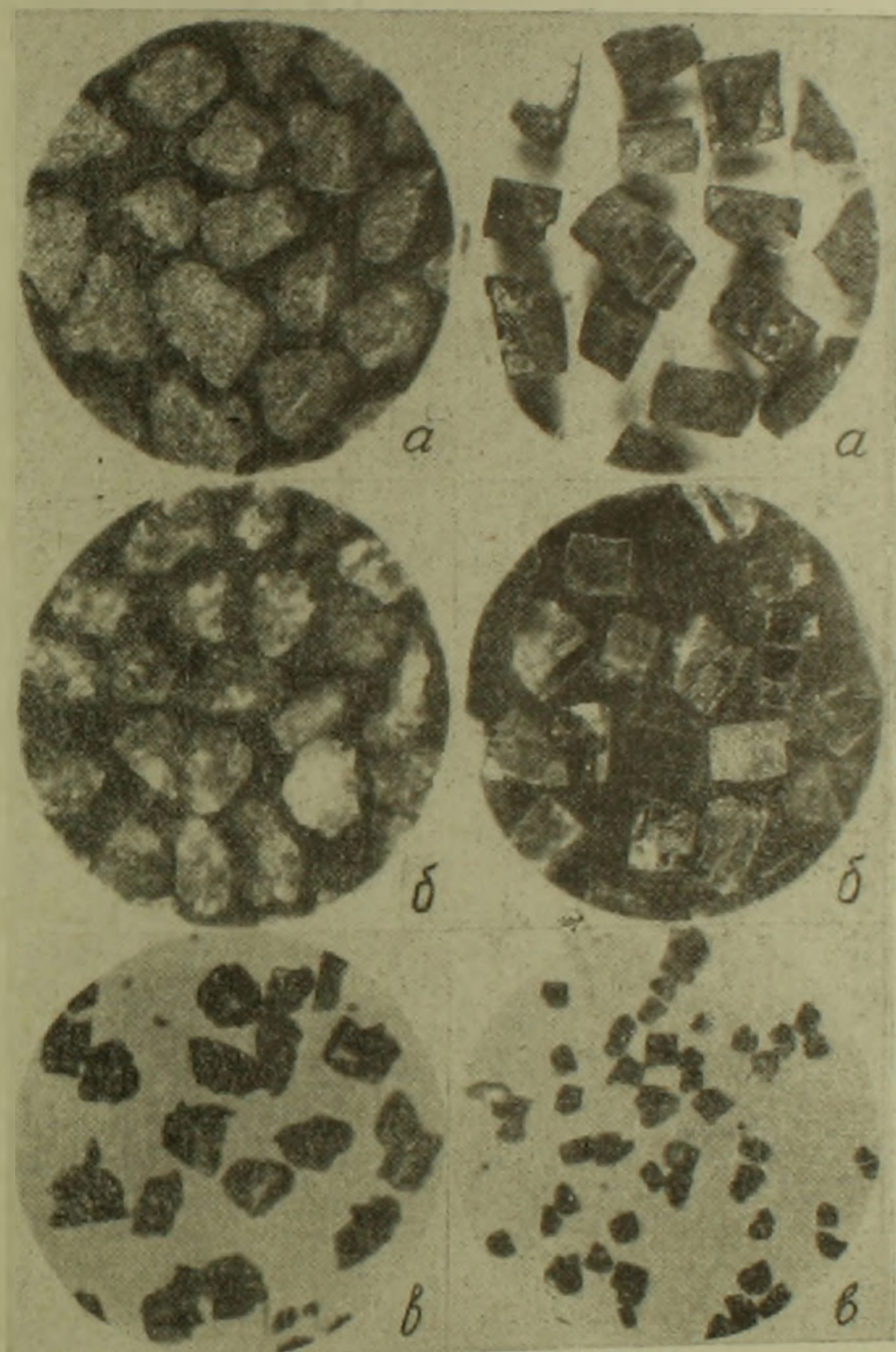


Фиг. 1.

Из сказанного напрашивается вывод об отсутствии закономерной зависимости U_0 от ψ и о принципиальной погрешности уравнений типа (1) и (2). Очевидно также то, что влияющим на U_0 фактором является конфигурация, форма частицы. С точки зрения гидродинамики подобны те частицы, которые имеют идентичные формы. Конечно, при этом будут идентичны также ψ, значение или измерение которой необязательно.

В литературе даются весьма расплывчатые определения для форм частиц: округлые, угловатые, пластинчатые, удлиненные, игольчатые и прочее. Очевидно, что такие определения далеко не достаточны для каких-либо расчетов.

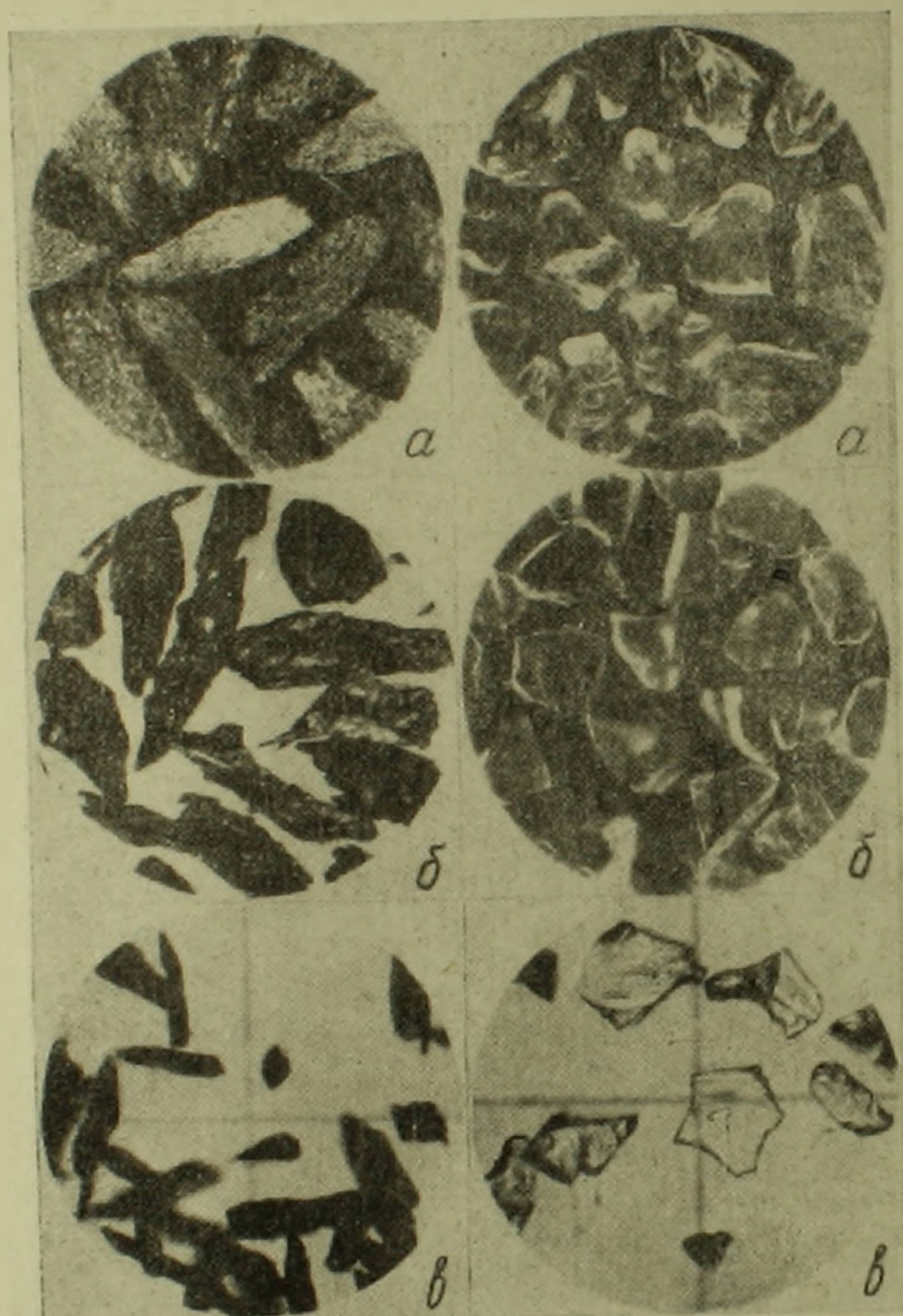
Соответствующие исследования нас привели к выводу, что форма частиц помола не зависит от величины частиц или степени измельченности материала. Данный минерал или данная порода при дроблении и измельчении образуют частицы, подобные между собой по форме, независимо от крупности. Это положение подтверждается приведенными микроснимками помолов базальта, галенита, буланжерита, стекла, барита и арагонита. Эти вещества подвергались измельчению в лабораторной шаровой мельнице или в ступке. Полученный помол фракционировался при помощи сит. На фотографиях *а* (фиг. 2—7) приведены частицы со средним натуральным размером в 3 *мм*, на снимках *б*—частицы 0,25 *мм*, а на фотографиях *в*—частицы пыли с натуральным размером от 0,005 до 0,02 *мм*.



Фиг. 2. Фиг. 3.

Общность формы, конфигурации частиц данного минерала, или данной породы, независимо от крупности, резко облегчает задачу об определении гидродинамической характеристики бесформенных частиц и вывод количественных уравнений для расчета их скорости падения.

Исследования стесненного падения бесформенных частиц помолов привели к возникновению гипотезы о псевдочастице ([5, 6, 7]). Суть этой гипотезы: частица в вязкой среде обвалакивается ею, углубления и неровности на поверхности частиц заполняются практически неподвижной, относительно частицы, средой. Частица вместе с приставшей средой образует одно целое, самостоятельное тело. При изыскании закономерностей движения частицы нужно иметь в виду не „голую" частицу, а частицу вместе с приставшей жидкостью—псевдочастицу. Количество приставшей жидкости зависит от формы частицы и числа Рейнольдса.



Фиг. 4. Фиг. 5.

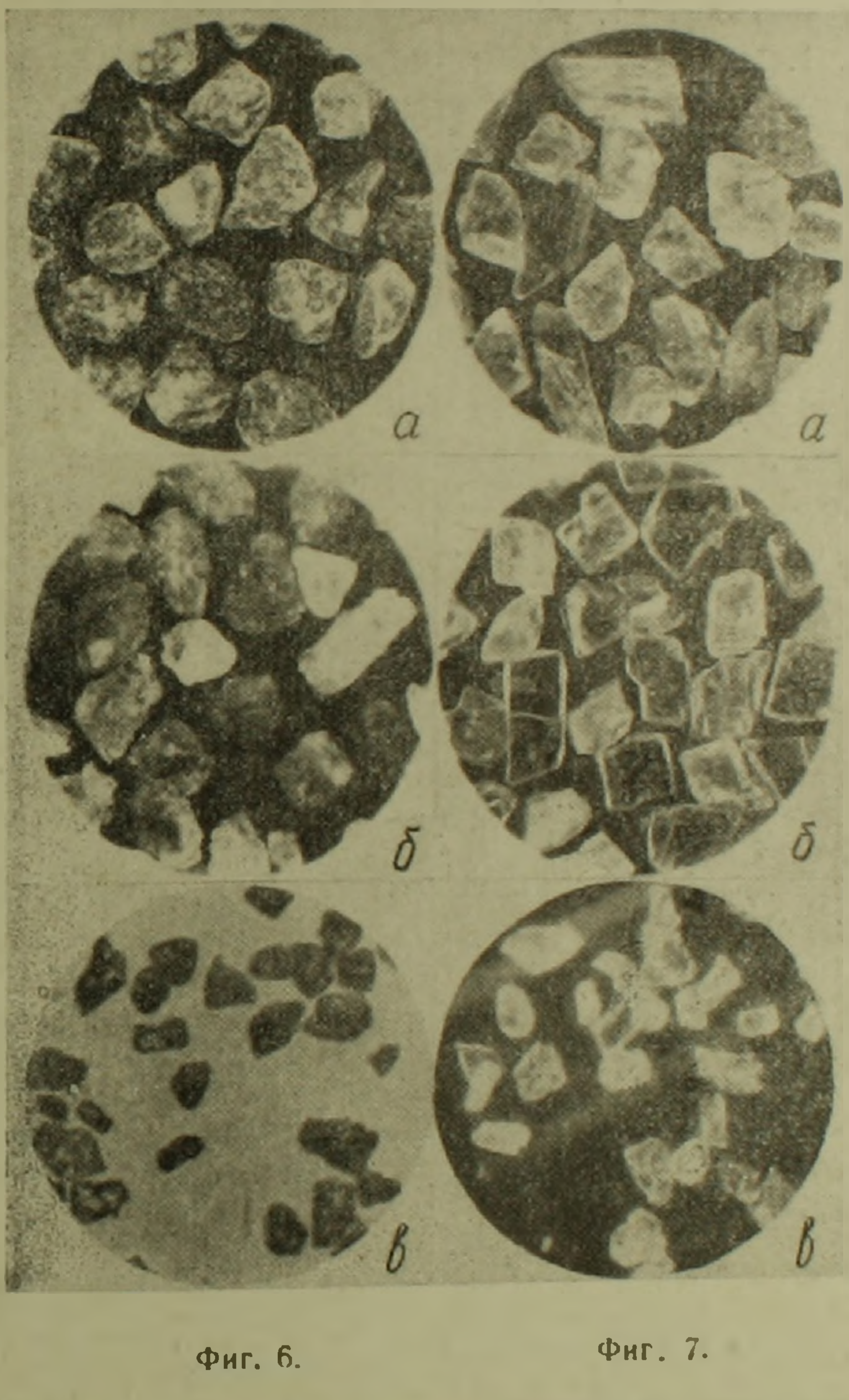
Основываясь на этих соображениях было выведено выражение:

$$U_0 = \frac{\beta}{\alpha^{1/3}} C_0, \qquad (3)$$

где α — объемный коэффициент псевдочастицы: отношение объема последней к объему „голой" частицы; β — коэффициент формы псевдочастицы, учитывающий замедление скорости последней по сравнению со скоростью эквивалентного псевдошара.

Выведенные на основании этой гипотезы и выражения (3) уравнения, описывающие скорость стесненного падения бесформенных частиц, были экспериментально проверены и подтверждены в широком диапазоне числа Рейнольдса ([5, 6, 7]). Среднеквадратичное отклонен составило 2,64%, а максимальное расхождение между опытами и расчетным значениями $\pm 6\%$.

Коэффицнент α достигает максимального значения α_0 в ламинарной области и имеет минимальное значение (единица) в турбулентной области, когда частица оголена или почти оголена. Коэффициент β имеет минимальное значение β_0 в турбулентной области падения и достигает максимума (приближаясь к единице) в ламинарной области.



Фиг. 6. Фиг. 7.

В переходной области эти коэффициенты переменны и зависят от числа Рейнольдса. Экспериментами с частицами помолов барита, арагонита, стекла и базальта (в пределах числа Рейнольдса от 0,14 до 1400) были обнаружены следующие эмпирические соотношения:

$$\alpha : \beta = \alpha_0; \qquad \alpha_0 \beta_0 = 1 \tag{4}$$

В переходной области, когда $3 < Re < 75$:

$$\alpha = 1{,}099\alpha_0 - 0{,}099 - 0{,}207(\alpha_0 - 1)\lg Re, \tag{5}$$

а при $75 < Re < 1000$:

$$\alpha = 1{,}89\alpha_0 - 0{,}89 - 0{,}63\,(\alpha_0 - 1)\lg \mathrm{Re} \qquad (6)$$

Таким образом, зная величину α_0 для частиц данного вещества, при помощи (4), (5) и (6) можно определить значения α и β для любого числа Райнольдса. Имея эти коэффициенты, из (3) определяется гидравлическая крупность U_0. Экспериментально найденные значения α_0 следующие:

базальт—1,380, галенит—1,162, буланжерит—1,480, стекло—1,350, барит—1,286, арагонит—1,300.

Выводы. 1. Показано, что отношение поверхности эквивалентной сферы к поверхности несферической частицы ψ не может служить гидродинамической характеристикой частицы.

2. Показано, что форма, конфигурация частиц помола характерна для данной породы или данного минерала и не зависит от величины частиц или степени измельченности.

3. Сделан вывод, что коэффициенты α и β псевдочастицы дают вполне приемлемую гидродинамическую характеристику частицы.

Институт органической химии
Академии наук Армянской ССР

Ա. Մ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ ԵՎ Ն. Ս. ԻԿԱՐՅԱՆ

Որոշ մասնիկների ձևի և հիդրոդինամիկական բնութագրի մասին

Նկատի ունենալով, որ նկար 1-ում ցույց տրված 1 և 2 մասնիկներն ունեն հավասար ծավալ և մակերևույթ, սակայն բոլորովին տարբեր անկման արագություն, եզրակացված է, որ տձև մասնիկների հիդրոդինամիկական վարքը չի կարելի բնութագրել նրանց գնդայնությամբ։ Մեր հետազոտությունները ցույց են տվել, որ ամեն մի նյութի աղացվածքի մասնիկներն ունեն իրենց յուրահատուկ ձևը՝ ընդհանուր կոնֆիգուրացիան, որը կախված չէ մասնիկների մանրացվածության աստիճանից և բնորոշվում է α_0 մեծությամբ։

Պսևդոմասնիկի հիպոթեզի հիման վրա արտածված (3) բանաձևը, էքսպերիմենտալ լայն բազայի վրա հաստատված (4) էմպիրիկ կապը և (5) և (6) հավասարումները հնարավորություն են տալիս ցանկացած Ռեյնոլդսի թվի համար որոշել α և β գործակիցները (երբ հայտնի է տվյալ նյութի α_0-ն), ինչպես նաև համապատասխան մասնիկների հիդրավլիկական խոշորությունը։ Պսևդոմասնիկի α և β գործակիցները տալիս են տձև մասնիկի միանգամայն ընդունելի հիդրոդինամիկական բնութագիրը։

ЛИТЕРАТУРА—ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *Н. И. Смирнов* и *Ли Де Эп*, ЖПХ, XXIV, № 4, 384 (1951). [2] *Л. Н. Еркова* и *Н. И. Смирнов*, ЖПХ, XXIX, 1347 (1956). [3] *Е. В. Люис* и *Е. В. Боверман*, Chem. Eng. Progr., 48, № 12, 603 (1952). [4] *К. Чаудхури* и *В. Фритц*, Chem. Eng. Sci., 11, № 2 (1959). [5] *А. М. Гаспарян* и *Н. С. Икарян*, ДАН АрмССР, т. XXVI, № 2 (1958). [6] *А. М. Гаспарян* и *Н. С. Икарян*, ДАН АрмССР, т. XXXV, № 1 (1962). [7] *А. М. Гаспарян* и *Н. С. Икарян*, Известия АН АрмССР (серия технических наук), т. XV, № 4 (1962).