

## **ЭФФЕКТИВНАЯ ВЯЗКОСТЬ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ И СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В СТОКСОВСКОМ РЕЖИМЕ**

*Канд. физ.-мат. наук Р. Б. РОЗЕНБАУМ,  
доктор физ.-мат. наук О. М. ТОДЕС  
(Ленинградский горный ин-т)*

Псевдоожиженный слой из мелких зерен (аэросуспензию), как известно, используют для разделения смеси частиц различной крупности и состава при гравитационном обогащении полезных ископаемых. Частицы породы и концентрата в таком слое разделяются по удельному весу [1, 2]. Эффективность разделения зависит от скорости оседания или всплывания той фракции, удельный вес которой близок к удельному весу слоя. В медленно движущихся кусках породы псевдоожиженный восходящим воздушным потоком слой играет роль тяжелой жидкости с некоторой эффективной вязкостью, величина которой представляет практический интерес [2—5].

Тело, движущееся в псевдоожиженном слое даже медленно, нарушает структуру слоя. Естественно ожидать, что результаты измерения эффективной вязкости слоя должны зависеть от выбранного метода измерения.

При измерениях вязкости роторными вискозиметрами [6, 7, 9] или лопастными мешалками [8] частицы под действием центробежных сил отбрасываются к периферии реактора, в результате чего в слое возникают значительные структурные нарушения.

Одинокое тело, падающее в слое, тоже нарушает его структуру в непосредственной близости от поверхности тела. Поскольку характер этих нарушений такой же, как и при гравитационном обогащении полезных ископаемых, измерять эффективную вязкость псевдоожиженного слоя для целей гравитационного обогащения следует, наблюдая за падением тел в таком слое [3]. Не исключено, что нарушения структуры слоя, вызываемые падением тел разной формы, различны, поэтому измеренная эффективная вязкость будет зависеть от формы и размеров падающих тел.

Движение стальных шаров в слое песка, псевдоожиженного воздухом, изучалось ранее [3]. С помощью электрического противовеса шары облегчались так, чтобы их удельный вес был близок к удельному весу кипящего слоя мелкозернистого песка с эквивалентным диаметром зерен порядка 0,3 мм.

В настоящей работе приводятся результаты исследования движения в таком же слое шаров и кубиков из других материалов (табл. 1).

Таблица 1

Параметры исследуемых тел

| Определяющий<br>размер тела,<br>см | Масса,<br>г | Материал | Плотность,<br>г/см <sup>3</sup> |
|------------------------------------|-------------|----------|---------------------------------|
| Ш а р                              |             |          |                                 |
| 0,953                              | 3,472       | Сталь    | 7,65                            |
| 0,718                              | 1,473       | »        | 7,65                            |
| 0,635                              | 1,017       | »        | 7,65                            |
| 1,002                              | 4,392       | Латунь   | 8,40                            |
| 0,678                              | 1,452       | »        | 8,40                            |
| 1,477                              | 4,730       | Алюминий | 2,78                            |
| 1,235                              | 2,711       | »        | 2,78                            |
| К у б и к                          |             |          |                                 |
| 0,748                              | 3,250       | Сталь    | 7,70                            |
| 0,500                              | 0,955       | »        | 7,70                            |
| 0,746                              | 3,518       | Латунь   | 8,40                            |
| 0,498                              | 1,018       | »        | 8,40                            |
| 0,998                              | 2,813       | Алюминий | 2,78                            |

Так как средой является псевдооживленный слой, в котором возможны как пульсационные, так и возвратные движения падающего тела, желательно было одновременно с измерением скорости его падения (подъема) проследить характер движения. Поэтому установка [3] была усовершенствована. На ось двигателя насаживался обтюраторный

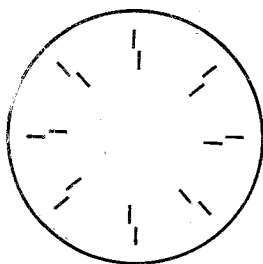


Рис. 1. Обтюраторный диск с прорезами

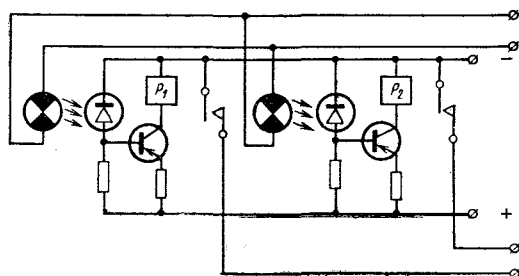


Рис. 2. Схема самописца

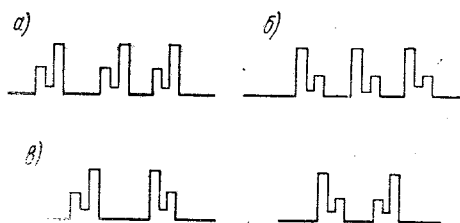


Рис. 3. Образцы записи на ленте самописца:

а — тело падает; б — тело поднимается;  
в — тело совершает возвратные движения

диск с двумя группами прорезов (рис. 1). Свет, попадающий через прорезь на фотодиод, замыкал реле, включенное в схему самописца (рис. 2). В регистрирующем устройстве предусмотрено два блока, каждый из которых, при попадании света на фотодиод, обеспечивал замыкание цепи. Это позволило получить на ленте самописца запись, образцы которой представлены на рис. 3.

По скорости протяжки ленты и числу образовавшихся пиков можно определить скорость падения тела, а по форме записи — характер его движения.

Условие установившегося падения шарика массой  $m$  и диаметром  $d$  имеет вид

$$F = (m - \frac{\pi d^3}{6} \rho_n - 2U)g - F_{тр}, \quad (1)$$

при равномерном движении вверх

$$F = (2U + \frac{\pi d^3}{6} \rho_n - m)g - F_{тр}, \quad (2)$$

где  $\rho_n$  — плотность псевдожидкости;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $U$  — противонапряжение на обмотке двигателя;  $F_{тр}$  — сила трения нити о диск.

Из графиков (рис. 4—7) видно, что сила сопротивления уменьшается по мере расширения слоя (при  $v = \text{const}$ ) и возрастает при увеличении размеров падающего тела. В области малых значений критерия Рейнольдса ( $Re < 1$ ) сила сопротивления падению тела возрастает пропорционально первой степени скорости и, следовательно, псевдооживленный слой по своим реологическим свойствам близок к вязкой жидкости.

Проведя аналогию между падением шара в вязкой жидкости и псевдожидкости, можно [3] для расчета эффективной вязкости слоя  $\mu^*$  применить формулу

$$\mu^* = \frac{F}{3\pi v_0 d}. \quad (3)$$

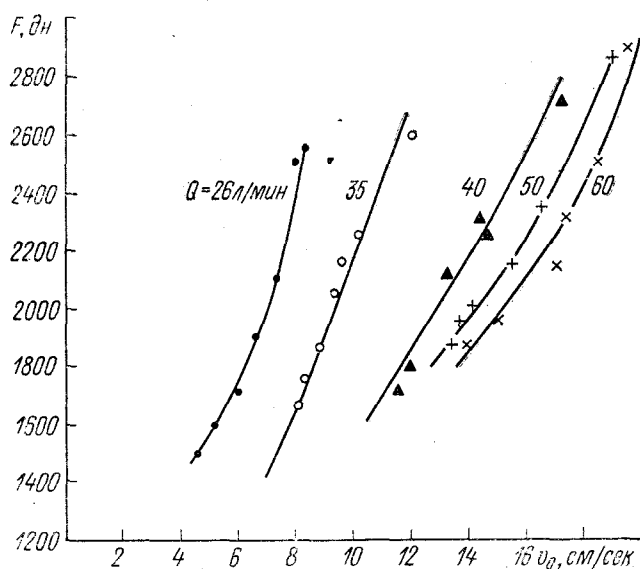


Рис. 4. Зависимость силы сопротивления от скорости падения алюминиевого шарика диаметром 1,477 см в песке при различных режимах псевдооживления

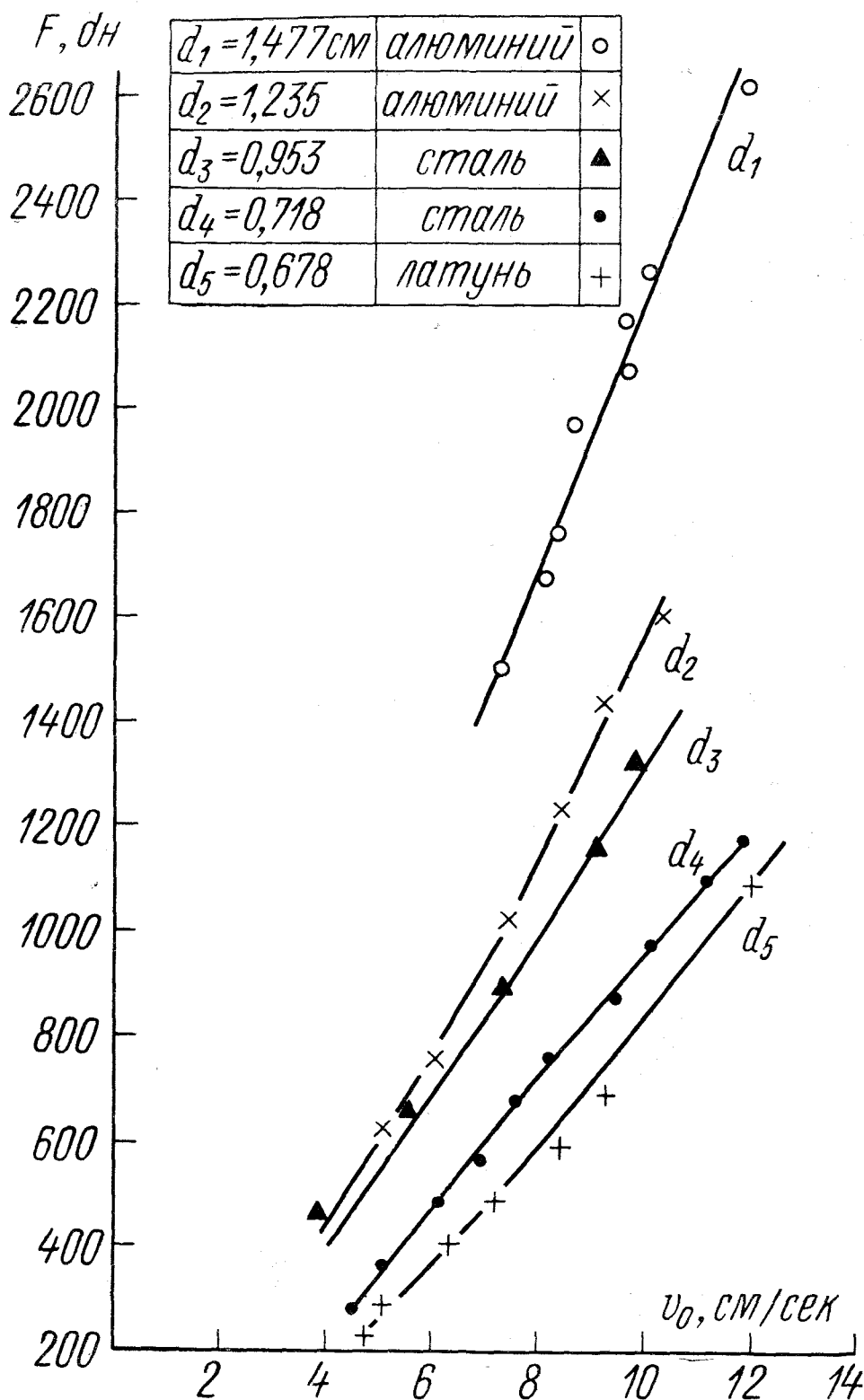


Рис. 5. Зависимость силы сопротивления от скорости падения шара в псевдооживленном слое

Очевидно, что по размерности  $\mu^*$  должно совпадать с вязкостью ожижающей среды  $\mu_0$

$$\mu^* = C_1 \mu_0,$$

где коэффициент  $C_1$  — функция параметров частиц слоя и режима псевдооживления.

Если бы характер нарушений структуры слоя не зависел от формы падающего тела, то значение  $\mu^*$  можно было бы определять, наблюдая за падением в слое кубиков, предварительно введя в формулу (3) коэффициент формы  $\varphi$

$$\mu^* = \frac{F}{\varphi 3\pi v_0 a}, \quad (4)$$

где  $a$  — длина ребра кубика.

Полагая коэффициент формы при падении кубиков в жидкости таким же, как при падении в псевдооживленном слое, можно  $\varphi$  определить экспериментально. Для этого в жидкость известной вязкости  $\mu_{ж}$  и плотности  $\rho_{ж}$  порознь бросали шарик и кубик. При медленном движении шарика с установившейся скоростью сила сопротивления

$$F_{ш} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{ш} - \rho_{ж}) g = 3\pi \mu_{ж} v_{ш0} d,$$

а при падении кубика

$$F_{куб} = a^3 (\rho_{куб} - \rho_{ж}) g = \varphi 3\pi \mu_{ж} v_{куб0} a.$$

Составив отношение

$$\frac{F_{куб}}{F_{ш}} = \frac{\varphi v_{куб0} a}{v_{ш0} d},$$

находим

$$\varphi = \frac{F_{куб} v_{ш0} d}{F_{ш} v_{куб0} a}.$$

Среднее значение коэффициента  $\varphi$ , определенное для случая падения кубика гранью, оказалось 1,38.

Значения эффективной вязкости, рассчитанные по формуле (4), колеблются в пределах 11—19 *пуаз*, что достаточно хорошо совпадает с результатами, полученными из наблюдений за падением шаров.

По формулам (3) и (4) были рассчитаны значения  $\mu^*$  при различных режимах псевдооживления слоя песка, засыпанного в колонну диаметром 8 см (табл. 2).

В табл. 2 приведены также средние значения эффективной вязкости для каждого из исследуемых режимов, соответствующих скоростям псевдооживающего слой воздуха, которые превышают минимально необходимую скорость от 1,2 до 2,5 раз. По мере возрастания скорости потока и расширения кипящего слоя эффективная вязкость последнего постепенно падает (примерно в два раза).

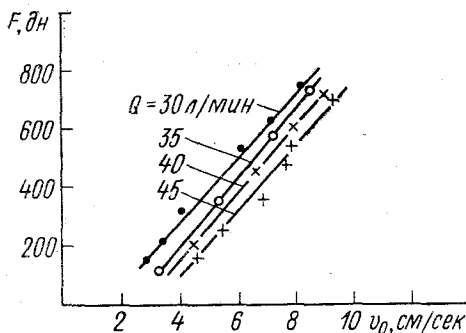


Рис. 6. Зависимость силы сопротивления от скорости падения стального кубика в песке, псевдооживленном воздухом ( $a = 0,500$  см)

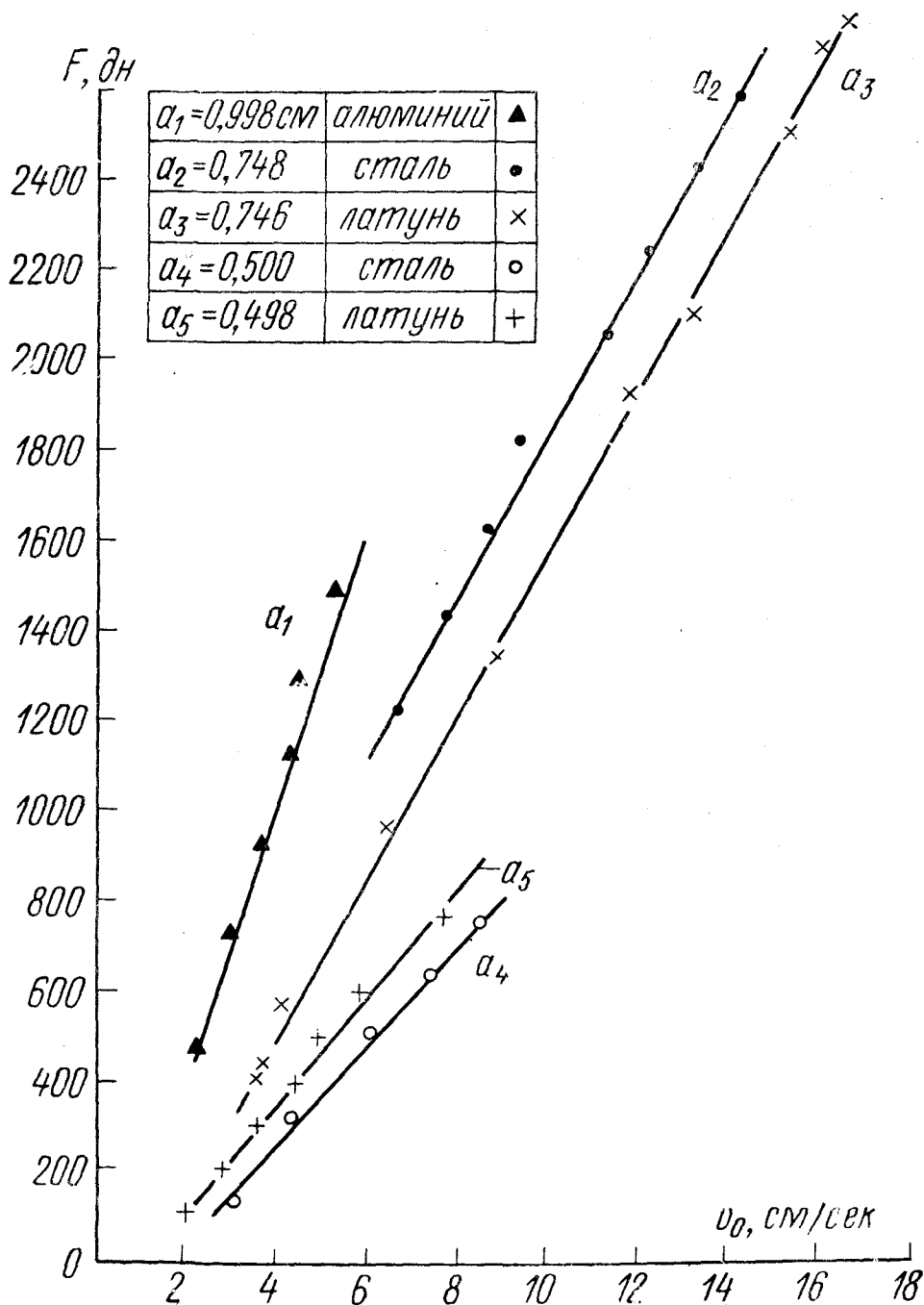


Рис. 7. Зависимость силы сопротивления от скорости падения кубиков в псевдооживленном слое

Результаты расчета  $\mu^*$ 

| Определяющий<br>размер тела,<br>см | Эффективная вязкость (в пузах) в зависимости<br>от расхода воздуха, л/мин |      |      |      |        |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------|------|------|--------|
|                                    | 30                                                                        | 35   | 40   | 45   | 50     |
| Ш а р                              |                                                                           |      |      |      |        |
| 1,477                              | 22,0                                                                      | 15,6 | 12,5 | —    | 10,4   |
| 1,235                              | 19,1                                                                      | —    | 17,2 | —    | 13,8   |
| 0,953                              | —                                                                         | 11,4 | —    | 11,3 | —      |
| 0,718                              | —                                                                         | —    | 12,5 | —    | 10,5   |
| 0,678                              | 11,7                                                                      | —    | 10,5 | —    | 9,7    |
| 0,635                              | —                                                                         | 14,3 | —    | 11,7 | 8,6    |
| К у б и к                          |                                                                           |      |      |      |        |
| 0,998                              | 36,0                                                                      | 28,9 | 22,8 | —    | —      |
| 0,748                              | 19,3                                                                      | 17,8 | 18,0 | 16,4 | —      |
| 0,746                              | 19,4                                                                      | —    | 19,2 | 19,0 | —      |
| 0,500                              | 11,4                                                                      | 11,8 | 11,2 | 11,2 | —      |
| 0,498                              | 13,4                                                                      | —    | 12,8 | —    | 12,3   |
|                                    | 19±5                                                                      | 17±5 | 15±4 | 14±3 | 11±1,5 |

Производительность аппарата кипящего слоя для гравитационного обогащения полезных ископаемых лимитируется временем оседания сростков, имеющих удельный вес, близкий к эффективному удельному весу разделяющей среды. На основе измеренных значений  $\mu^*$  можно оценить возможную производительность подобных аппаратов.

При плотности псевдоожиженного слоя песка  $\rho_n = 1500 \text{ кг/м}^3$  (удельный вес по воде 1,5) куски чистого угля будут всплывать, а породы — тонуть. Для сростка диаметром 50 мм, с удельным весом 1,6 и содержанием породы около 30% определенная по закону Стокса скорость оседания в слое с эффективной вязкостью 15 пуаз составит приблизительно 1 мм/сек.

При глубине ванны 200 мм такие сростки будут опускаться за 2 мин. Следовательно, при длине ванны 2 м поток обогащаемого материала можно будет пропускать через аппарат со скоростью 1 м/мин. Если подаваемые куски движутся на расстояниях порядка их размеров, то в пересчете на сплошной слой это составит около 0,2 м/мин, что соответствует производительности аппарата по загружаемому для обогащения продукту 20 кг/мин на 1 м обогатительной ванны с кипящим слоем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимова Е. В. Из опыта обогащения угля в кипящем слое. Обогащение и брикетирование углей. ЦИТИУгля, 1963, № 7.
2. Герасимова Е. В. Обогащение воркутинских углей в аэросуспензиях. Обогащение и брикетирование углей. ЦИТИУгля, 1965, № 8.
3. Тодес О. М., Розенбаум Р. Б. Вязкость псевдоожиженного слоя. Зап. ЛГИ, т. 51, вып. 3, 1970.
4. John S. M., Kolk M. Chem. Eng. Progr. Symp. Ser., v. 67, № 116, 1971.
5. Douglas E., Sayles C. P., Chem. Eng. Progr. Symp. Ser., v. 67, № 116, 1971.
6. Furukawa J., Ohmae T., Ind. Eng. Chem., v. 50, 1958.
7. Matheson G. L., Herbs W. A., Holt P. H., Ind. Eng. Chem., v. 41, 1949.
8. Nagyard T., Sacerdote A. M., Ind. Eng. Chem. Fundamentals, v. 5, 1966.
9. Shugert K., Merz M., Fetting F., Chem. Eng. Sci., v. 15, 1961.