

15. Привалов В.Е., Фридрихов С.А. «Зависимость мощности излучения He-Ne лазера от геометрии сечения разрядного промежутка» // Журнал технической физики. – 1968. – Т.37. – № 12. – С.2080.
16. Привалов В.Е., Юдин С.Ф. «Влияние формы сечения разрядного промежутка на усиление активной среды газового лазера» // Квантовая электроника. – 1974. – Т.11. – С.2484.
17. Привалов В.Е. Геометрия газового разряда и усиление излучения лазера // Известия ВУЗов. Физика. – 2010. – Т.53. – № 5/2. – С.80.
18. Привалов В.Е., Фридрихов С.А. Кольцевой газовый лазер // Успехи физических наук. – 1969. – Т.97. – С.377.
19. Федотов А.А. Кандидатская диссертация. Л.: ЛЭТИ, 1974.
20. Золотов С.А., Привалов В.Е. Влияние геометрии активного элемента на коэффициент усиления газового лазера // Научно-технические ведомости СПбГПУ (физ.мат.науки). – 2012. – №3. – С.59.
21. Zolotov S.A., Privalov V.E. Gas Discharge Lasers for Nanometry // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics). – 2012. – v.21. – №4. – p.260/
22. Привалов В.Е. Газоразрядные лазеры в измерительных комплексах. – Л.: Судостроение, 1989. – 260с.
23. Золотов С.А., Привалов В.Е. Патент России № 95909, опубл. 2010
24. Золотов С.А., Привалов В.Е. Патент России № 101276, опубл. 2011

УДК: 532.529, 519.63

МЕХАНИЗМ УСКОРЕННОЙ СЕДИМЕНТАЦИИ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ В БИДИСПЕРСНОЙ СУСПЕНЗИИ

Миньков Леонид Леонидович

докт. физ.-мат. наук, профессор Томского государственного университета, г. Томск

Степанова Юлия Олеговна

студентка 4 курса Томского государственного университета, г. Томск

АННОТАЦИЯ

Приведена оценка увеличения средней скорости оседания мелких частиц бидисперсной суспензии вследствие их попадания в циркуляционную зону, образующуюся при ламинарном обтекании несжимаемой жидкостью крупных сферических частиц. Показано, что увеличение скорости седиментации мелких частиц определяется концентрацией крупных частиц в бидисперсной суспензии, а скорость оседания мелких частиц пропорциональна квадрату отношения диаметров крупной и мелкой частиц.

Ключевые слова: циркуляционная зона; скорость седиментации; увлечение частиц; бидисперсная суспензия.

MECHANISM OF ACCELERATED SEDIMENTATION OF FINE PARTICLES IN BIDISPERSE SUSPENSION

Minkov L.L.

Doctor of Phys.-Math. Sciences, professor of Tomsk State University, Tomsk

Stepanova Yu.O.

4 year student of Tomsk State University, Tomsk

ABSTRACT

An estimation of increasing the average volume sedimentation velocity of fine particles in bidisperse suspension due to their capturing in the circulation zone formed in the laminar flow of incompressible viscous fluid around the spherical coarse particle is proposed. It is found that the acceleration of sedimentation of fine particles is determined by the concentration of coarse particles in the bidisperse suspension, and the sedimentation velocity of fine fraction is proportional to square of coarse and fine particle diameter ratio.

Keywords: circulation zone; sedimentation velocity; particle entrainment; bidisperse suspension.

При работе малоразмерных гидроциклонов качество разделения частиц по размерам в области тонких фракций ухудшается, что ведет к росту сепарационной функции с уменьшением размера частиц [1, 2]. Аномальный рост сепарационной функции связывают с тем, что имеет место ускоренная седиментация мелких частиц, служащая причиной усиленного выноса мелких фракций суспензии вместе с крупными фракциями из гидроциклона [2, 3]. К настоящему времени механизм процесса ускоренной седиментации мелких частиц изучен недостаточно.

Для объяснения этого эффекта в работе [4] была предложена ячеистая модель, построенная на определении среднего времени пребывания мелкой частицы в ячейке, окружающей крупную частицу, и последующего определения средней скорости оседания мелкой частицы. В работе [5] ускоренная седиментация мелких частиц объяснялась их удержанием в погранслое крупной частицы, которое имело место для чисел $Re < 25$. При последующем увеличении числа Рейнольдса наблюдается отрыв погранслоя, и мелкие частицы не в состоянии удерживаться в окрестности крупной частицы. Другим объяснением ускоренного оседания можно считать захват крупной частицей мелких частиц, попадающих в гидродинамический след, образующийся за крупной частицей при числах $Re > 25$ [6].

Целью данной работы является определение среднеобъемной скорости оседания мелких частиц при седиментации бидисперсной суспензии на основе ячеистой модели и возникающей при обтекании крупной сферической частицы ламинарным потоком несжимаемой жидкости циркуляционной зоны.

Рассмотрим седиментацию бидисперсной суспензии, состоящей из смеси крупных частиц диаметром d_c и мелких частиц диаметром d_f . Вокруг каждой

крупной частицы построим сферическую ячейку объемом $\nu_{яч}$. Предположим, что при совместном оседании мелкие частицы, попавшие в циркуляционную зону, образовавшуюся за крупной частицей, имеют скорость оседания, такую же, как и крупная частица, $U_c \sim d_c^2/f(Re)$, а другие мелкие частицы оседают со своей собственной скоростью (близкой к стоксовской): $U_f \sim d_f^2$. Здесь $f(Re) = 1 + 0.15Re^{0.687}$ – функция сопротивления сферической частицы [7]. Пусть циркуляционная зона имеет объем $\nu_{цирк} < \nu_{яч}$, тогда среднеобъемная скорость оседания мелкой частицы в ячейке найдется из выражения:

$$\langle U_f \rangle = \frac{\nu_{цирк}}{\nu_{яч} - \nu_{сф}} U_c + \frac{\nu_{яч} - \nu_{цирк}}{\nu_{яч} - \nu_{сф}} U_f$$

Учитывая, что объемная доля крупных частиц выражается через объем ячейки $\nu_{яч}$ и объем самой частицы $\nu_{сф}$ соотношением $\alpha_c = \nu_{сф}/\nu_{яч}$, а зависимость объема циркуляционной зоны $\nu_{цирк}(Re)$ для $25 < Re < 1000$ была получена в работе [8] на основе численного решения уравнений Навье – Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, обтекающей сферическую частицу, в виде $\nu_{сф} \cdot g(Re)$,

где $g(Re) = -0.258 + 1.017 \frac{Re}{100} - 3.78 \cdot 10^{-2} \left(\frac{Re}{100} \right)^2$, то относительная среднеобъемная скорость оседания мелкой частицы будет иметь вид:

$$\frac{\langle U_f \rangle}{U_f} = \frac{1}{1 - \alpha_c} + \frac{\alpha_c g(Re)}{1 - \alpha_c} \left(\frac{1}{f(Re)} \left(\frac{d_c}{d_f} \right)^2 - 1 \right). \quad (1)$$

Относительная среднеобъемная скорость оседания мелких частиц увеличивается пропорционально отношению квадратов диаметров крупной и мелкой частиц, что находится в согласии с экспериментальными данными работы [9], полученными для водо-песчаной суспензии в тарельчатой центрифуге. Более того, увеличение объемной доли крупных частиц также ведет к монотонному росту относительной скорости оседания мелких частиц.

Границы применимости полученной формулы определяются тем, что циркуляционная зона должна полностью находиться внутри сферической ячейки, что в свою очередь накладывает ограничение на объемную долю крупных частиц [8] $\alpha_c \leq \alpha_{\max}(Re) = \left[1 + 5.616 \cdot \exp(-28.778/Re^{0.7}) \right]^{-3}$.

Как следует из (1) максимальное увеличение скорости седиментации мелких частиц при совместном их оседании с крупными частицами получается при значении $\alpha_c = \alpha_{\max}(Re)$. Тогда выражение для максимально возможного значения относительной среднеобъемной скорости оседания мелких частиц в зависимости от Re имеет вид:

$$\frac{\langle U_f \rangle_m}{U_f} = \frac{1}{1 - \alpha_{\max}(\text{Re})} + \frac{\alpha_{\max}(\text{Re})g(\text{Re})}{1 - \alpha_{\max}(\text{Re})} \left(\frac{1}{f(\text{Re})} \left(\frac{d_c}{d_f} \right)^2 - 1 \right), \quad (2)$$

Анализ (2) показывает, что с увеличением Re до 40 значение $\langle U_f \rangle_m$ возрастает, а затем падает, что связано с разными скоростями роста объема циркуляционной зоны и ее протяженности. Средняя скорость седиментации мелких частиц при оседании частиц бидисперсной суспензии может быть больше стоксовской в 3 раза для $d_c/d_f = 10$ и в 150 раз для $d_c/d_f = 100$.

Список литературы

1. Heiskanen K. Particle Classification. Chapman and Hall, London–Glasgow–New York–Tokyo–Melbourne–Madras, 1993.
2. Finch J. A. Modeling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves // Powder Technol. 1983. No. 36. Pp. 127–129.
3. Neesse Th., Dueck J., Kerkhoff Th. Feinstkornabscheidung im Hydrozyklon // Aufbereitungstechnik. – 1996. – V.37, No.9. – P.413–421.
4. Dück J., Minkov L., Neeße Th. A hydrodynamic model for enhanced sedimentation of small particles in a bidisperse suspension // Thermophysics and Aeromechanics. – 2001. – V.8, No.2 – P.259-269.
5. Schubert H. On the origin of «anomalous» shapes of the separation curve in hydrocyclone separation of fine particles // Part. Sci. Technol. – 2004. – V. 22, No.3. – P.219-234.
6. Ван-Дайк М. Альбом течения жидкости и газа. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
7. Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Z. Ver. Deutsch. Ing. – 1935. – Vol. 77. – P. 318.
8. Миньков Л.Л., Степанова Ю.О. Влияние циркуляционной зоны на скорость оседания мелких частиц бидисперсной суспензии // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2013. – №5. – С. 70–77.
9. Gerhart Ch., Dück J., Neeße Th. Grundlagen-untersuchungen zur behinderten Sedimenta-tion polydisperser Suspensionen bei der Hydrostromklassierung. Teil I: Untersuchungen in einer Laborzentrifuge //Aufbereitungstechnik. – 1999. – Vol. 40, №7. – P. 328–334.