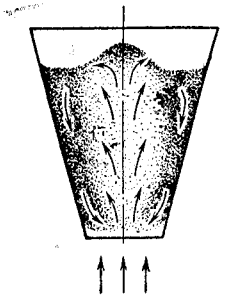
Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова т. L, вып. 3, 1970 г.

О ФОНТАНИРУЮЩЕМ СЛОЕ В СИСТЕМЕ ЖИДКОСТЬ—ТВЕРДОЕ

А. Е. Горштейн, А. П. Посецельский, В. В. Зобнин

Одним из интенсивных способов осуществления контактирования твердого материала с жидкостью может служить фонтанирующий слой [1—3]. Если его гидродинамическим закономерностям в системе Г—Т посвящено значительное число работ [1—8], то по гидродинамике и массообмену фонтанирующего слоя в системе Ж—Т — работ практически нет. Отсутствие полной аналогии в поведении этих двух гетерогенных систем, вызванной существенным различием в вязкости и плотности легких фаз Ж и Г, настоятельно требует проведения самостоятельных гидродинамических исследований фонтанирующего слоя в системе Ж—Т.



Фонтанирующий слой (визуальная картина)

Внешняя картина слоя при фонтанировании твердого материала жидкостью (см. рисунок) практически не отличается от процесса, происходящего в системе Г—Т [6]. Наличие переменного сечения по высоте аппарата также [1] приводит к распределению материала по двум зонам с различной концентрацией твердой фазы и противоположным направлением движения зернистого материала в разреженном ядре потока и плотной периферийной зоне. Наиболее интенсивен межзональный обмен частицами в нижнем и верхнем участках слоя, хотя частицы из ядра в кольцо переходят вдоль всей внутренней границы фонтана. Пе-

репад давления при фонтанировании жидкостью также [4, 9—11] характеризуется аномальным пиком давления.

Как и для гетерогенной системы Г—Т, гидродинамические исследования фонтанирования жидкостью можно начать с рассмотрения двух предельных случаев — фильтрации жидкости через пористую среду и гидротранспорт твердых материалов. В действительности, очевидно, должны иметь место оба режима, поскольку скорость легкой фазы больше скорости движения зерен материала, т. е. происходит квазифильтрация жидкости, с другой стороны, осуществляется перемещение твердых частиц, т. е. транспортирование тяжелой фазы в пределах ядра фонтанирующего слоя.

Решение ряда технологических и конструктивных вопросов применительно к процессам, осуществляемым в режиме фонтанирования, требует оценки характера и скорости движения твердой фазы, а также кратности циркуляции зернистого материала.

Производительность аппарата, обусловленная временем контакта фаз, необходимого для технологического процесса, для фонтанирующего слоя, в основном будет определяться скоростью перемещения твердой фазы в ядре и кратностью циркуляции ее между ядром и кольцом.

Для отыскания скорости движения твердого материала необходимы соответствующие сведения о кинетической характеристике легкой фазы. С этой точки зрения рассмотрение явления фонтанирования в системе Ж—Т имеет смысл начать с первого предельного случая — фильтрации.

Фильтрация однородной несжимаемой жидкости сквозь пористую среду под действием градиента давления удовлетворительно описывается уравнением Дарси [12]

$$V = -\frac{K}{\mu}\left[\dot{l}_x \frac{\partial p}{\partial x} + \dot{l}_y \frac{\partial p}{\partial y} - \dot{l}_z \left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g\right)\right], \qquad (1)$$

где V — объемный расход жидкости через единицу площади поперечного сечения пористого материала; $K = \frac{\varepsilon'}{B}$ — проницаемость пористой среды; ε' — пористость материала (в нашем случае соответствует порозности твердого материала ε); B — некоторая постоянная, пропорциональная удельной поверхности материала; μ — коэффициент кинематической вязкости жидкости; p — давление жидкости; $\dot{l}$ — единичные векторы, направленные вдоль соответствующих осей прямоугольных де-

картовых координат x, y, z; ρ — плотность жидкости; g — гравитационное ускорение.

Если ввести представление о потенциале течения жидкости, определяемом как

$$\psi = p + \rho g z, \tag{2}$$

то уравнение Дарси можно представить в виде

$$V = \frac{K}{\mu} \Delta\psi, \tag{3}$$

где величина V относится к местному значению давления [13].

Таким образом, расход жидкости через ядро и кольцо, в зависимости от распределения давления между этими зонами, а также порозности твердой фазы, можно определить из уравнения (3).

Рассмотрим i-ю частицу, находящуюся внутри фонтанирующего ядра на его оси. Пусть эту частицу характеризуют: масса m_i (плотность $\rho_ч$ и диаметр $d_ч$) и скорость перемещения w_i. На частицу, находящуюся в движении, действуют следующие силы: гравитационная $m_i g$; выталкивающая архимедова $\frac{\pi d_ч^3}{6} g (\rho_ч - \rho_c)$; гидродинамическая движущегося потока жидкости

$$\zeta \frac{\pi d_ч^2}{4} \cdot \frac{\rho_c (w_c - w_i)^2}{2},$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления при обтекании частицы; w_c — скорость потока; ρ_c — плотность жидкости.

Будем считать, что частица совершает лишь прямолинейное движение, совпадающее с осью z аппарата по направлению, т. е. отсутствуют как радиальные перемещения, так и вращательные вокруг собственной оси. Тогда, в соответствии с принципом Даламбера,

$$-m_i \frac{dw_i}{d\tau} + \frac{\pi d_ч^3}{6} g (\rho_ч - \rho_c) - m_i g + \zeta \frac{\pi d_ч^2}{4} \cdot \frac{\rho_c (w_c - w_i)^2}{2} = 0. \tag{4}$$

Граничными условиями здесь являются

$$w_i \big|_{\tau=0} = 0 \text{ и } w_i \big|_{\tau=\tau_k} = 0,$$

где $\tau=0$ соответствует моменту входа частицы в ядро потока, а $\tau_к$ — моменту начала перехода ее в плотное кольцо на верхней границе фонтана, в этом случае вертикальная составляющая скорости оказывается равной 0 [6].

Исключим m_i, вводя произведение плотности частицы на ее объем

$$-\frac{dw_i}{d\tau}+\frac{g(\rho_ч-\rho_c)}{\rho_ч}-g+\frac{3}{4}\zeta\frac{\rho_c}{\rho_ч}\cdot\frac{(w_c-w_i)^2}{d_ч}=0. \qquad (5)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ζ есть функция режима обтекания твердой частицы, т. е. для данного гидравлического режима ζ является известной функцией критерия Re.

Скорость обтекания частицы $(w_c—w_i)$ является функцией текущей координаты z, поскольку скорость потока жидкости w_c уменьшается вследствие увеличения сечения конической части аппарата, что, в свою очередь, приводит к падению w_i. Следует отметить, что скорость обтекания по мере подъема частицы вверх падает довольно быстро, так как $w_c(z)$ и $w_i(z)$ быстро уменьшаются с увеличением значения z.

Полагая w_c известной функцией z, представим уравнение (5) в виде

$$-\frac{dw_i}{dz}+\sigma+\Delta+\gamma w_c^2-2w_c\gamma w_i+\gamma w_i^2=0 \qquad (6)$$

или

$$(w_i)'+\gamma(z)w_i^2+\lambda(z)w_i+\Upsilon(z)=0. \qquad (7)$$

Здесь

$$-\sigma=\frac{(\rho_ч-\rho_c)}{\rho_ч}g;\ \Delta=-q;\ \gamma=\frac{3}{4}\zeta\frac{\rho_c}{\rho_ч d_ч};$$

$$\lambda=2w_c\gamma;\ \Upsilon=(\sigma+\Delta+\gamma w_c^2).$$

Соотношение (7) представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка типа общего уравнения Риккати. *

Таким образом, совместное решение уравнений (3) и (7) дает возможность определить основные кинетические характеристики твердой фазы и в свою очередь — среднее время пребывания материала в аппарате с фонтанирующим слоем и тем самым — его производительность.

---

* Линеаризацию и способы решения таких уравнений см. у Э. Камке [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мухленов И. П., Горштейн А. Е. Исследование фонтанирующего слоя. Хим. пром., № 6, 1965.

2. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. Основы техники псевдоожижения. Изд-во Химия, 1967.

3. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. Изд-во Химия, 1968.

4. Мухленов И. П., Горштейн А. Е. Гидравлическое сопротивление взвешенного слоя в безрешеточном коническом аппарате. Ж. прикл. химии, т. 36, № 3, 1964.

5. Горштейн А. Е., Мухленов И. П. Критическая скорость газа, соответствующая началу фонтанирования. Ж. прикл. химии, т. 37, № 9, 1964.

6. Горштейн А. Е., Мухленов И. П. К вопросу о механизме образования фонтанирующего слоя. Процессы химической технологии, стр. 16. Изд-во Наука, 1965.

7. Горштейн А. Е., Мухленов И. П. О движении твердого материала в фонтанирующем слое. Ж. прикл. химии, т. 38, № 11, 1967.

8. Айнштейн В. Г. Гидродинамика и структура фонтанирующих слоев. Хим. пром., № 3, 1968.

9. Забродский С. С. О гидравлическом сопротивлении слоя при псевдоожижении в конических аппаратах. Инж.-физ. журн., т. 4, № 2, 1961.

10. Гельперин Н. И. и др. Гидродинамические особенности псевдоожижения зернистых материалов в конических аппаратах. Химия и технология топлива и масел, № 8, 1960.

11. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Тимохова Л. П. Гидродинамические особенности псевдоожижения зернистых материалов в конических аппаратах. Хим. машиностр., № 4, 1961.

12. Коллинз Р. Течение жидкости через пористые материалы. Изд-во Мир, 1964.

13. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. ОГИЗ, 1937.

14. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Изд-во Наука, 1965.

104 109