

Н. И. СЫРОМЯТНИКОВ

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ВЗВЕШЕННОГО СЛОЯ

(Представлено академиком А. И. Некрасовым 30 IX 1953)

Во многих отраслях техники для интенсификации процессов реакционного обмена, для катализа, фильтрации, сушки и термической обработки находит все более широкое применение слой мелкозернистых материалов, взвешенных в восходящем потоке газа или жидкости.

Для обоснованного расчета гидродинамики аппаратов и анализа кинетики процессов, протекающих во взвешенном слое, с целью их рациональной организации необходимо знать распределение давлений и концентраций по высоте слоя. Известные теоретические и экспериментальные исследования по гидродинамике «кипящего» слоя (¹, ²) не дают ответа на этот вопрос, в них находится лишь суммарное сопротивление «кипящего» слоя, а концентрация частиц по объему принимается постоянной. Кроме того при построении теории процесса не учитывается влияния частиц друг на друга, что приводит к ошибочному выводу о прямолинейности пьезометрической кривой.

Беспорядочное движение частиц во взвешенном слое под влиянием гидродинамических сил потока и сил гравитационного поля внешне напоминает тепловое движение молекул газа. При таком движении взаимодействие частиц друг на друга в любом силовом поле может быть учтено по известному статистическому закону для распределения давлений:

$$P = P_0 e^{-Ah}, \quad (1)$$

где P — избыточное давление на высоте h ; P_0 — избыточное давление на нулевом уровне; A — коэффициент, пропорциональный кинетической энергии движущихся частиц.

Внешнее сходство беспорядочного движения частиц во взвешенном слое с тепловым движением молекул и броуновых частиц допускает возможность применения статистической теории к взвешенному слою.

С целью экспериментальной проверки статистической теории взвешенного слоя нами была проведена серия опытов с частицами песка, неодинаковыми по размерам частицами кокса и частицами шамота с приведенным диаметром до 5 мм.

Взвешенный слой создавался в цилиндрической колонке диаметром 52 мм и высотой 1500 мм потоком воздуха, подаваемого под металлическую сетку от компрессора через измерительную диафрагму. Тарировка в начале и конце каждого опыта позволяла учесть гидродинамические показатели самой установки.

Первоначальная высота засыпки, высота взвешенного слоя и скорость фильтрации изменялись в широких пределах: соответственно, от 25 до 175 мм, от 100 до 900 мм и от 0,2 до 3,0 м³/м² · сек.

Замеры давления пневмометрической трубкой производились через каждые 25 мм. Каждый опыт воспроизводился не менее 6 раз. Всего

проведено более 1260 замеров. Результаты опытов обработаны в логарифмических координатах.

На рис. 1 показаны результаты двух опытов — с частицами речного песка и частицами кокса. Как видно, в обоих случаях экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую, описываемую уравнением (1), подтверждая тем самым возможность применения его к рассматриваемой задаче. Кроме того из графика видно, что коэффициент A по высоте взвешенного слоя остается практически постоянным.

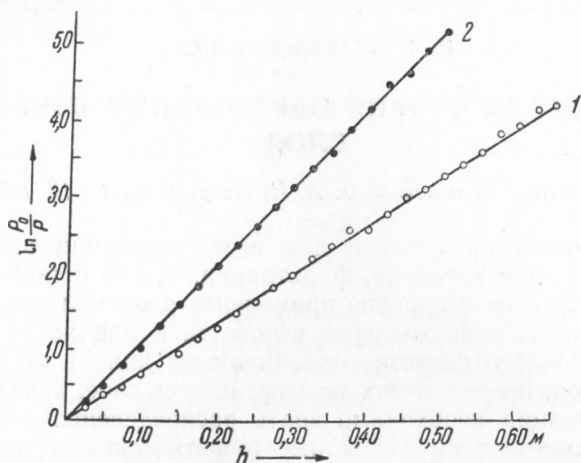


Рис. 1. Изменение давлений по высоте взвешенного слоя. 1 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $Q = 2,96$ м³/м²·сек, $G = 150$ г, $h_{взв} = 650$ мм; 2 — песок, $d = 1,0$ мм, $Q = 2,45$ м³/м²·сек, $G = 400$ г, $h_{взв} = 500$ мм

Из граничных условий при $h = h_{взв}$ и $\ln P = 0$ получим:

$$A = \frac{\ln P_0}{h_{взв}} = \frac{\ln \left(\frac{G}{F} \right)}{h_{взв}}. \quad (2)$$

Тогда

$$P = P_0^{(1-h/h_{взв})} = \left(\frac{G}{F} \right)^{(1-h/h_{взв})}, \quad (3)$$

где G — вес засыпки; F — площадь поперечного сечения колонки; $h_{взв}$ — высота взвешенного слоя — находится по отметке при $P = 0$.

Последнее уравнение более удобно для практического пользования и экспериментальной проверки. На рис. 2 все экспериментальные точки группируются около одной прямой, отвечающей уравнению (3). Разброс точек тем меньше, чем больше порозность взвешенного слоя. Наибольшие абсолютные отклонения не превышают 10%.

Исходя из полученных результатов, для распределения концентраций однородных частиц можно принять:

$$n = n_0 e^{-Ah} \quad (4)$$

или для весовой концентрации любых частиц

$$\gamma = \gamma_0 e^{-Ah} = \gamma_0 P_0^{h/h_{взв}}. \quad (5)$$

Зная весовую концентрацию частиц в слое γ и кажущийся удельный вес частиц γ_T , для порозности взвешенного слоя получим

$$m = \frac{\gamma_T - \gamma}{\gamma_T} \quad (6)$$

или

$$\frac{1-m}{1-m_0} = P_0^{-h/h_{взв}} = \left(\frac{G}{F}\right)^{-h/h_{взв}} \quad (7)$$

Из условий сплошности и (7) получим для определения скорости движения жидкости

$$w = \frac{Q}{m} = \frac{1}{1 - (1 - m_0) \left(\frac{G}{F}\right)^{-h/h_{взв}}} Q, \quad (8)$$

где Q — скорость фильтрации; m_0 — порозность слоя на уровне решетки.

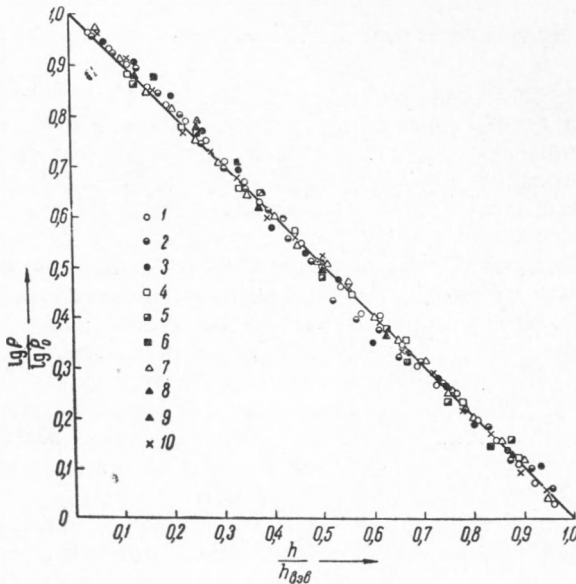


Рис. 2. 1 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $P_0 = 76$ мм в. с., $h_{взв} = 650$ мм; 2 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $P_0 = 75$ мм в. с., $h_{взв} = 575$ мм; 3 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $P_0 = 72$ мм в. с., $h_{взв} = 375$ мм; 4 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $P_0 = 26$ мм в. с., $h_{взв} = 225$ мм; 5 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $P_0 = 24,8$ мм в. с., $h_{взв} = 200$ мм; 6 — кокс, $d = 1,25-5$ мм, $P_0 = 24$ мм в. с., $h_{взв} = 150$ мм; 7 — песок, $d = 1$ мм, $P_0 = 205$ мм в. с., $h_{взв} = 500$ мм; 8 — песок, $d = 1$ мм, $P_0 = 98$ мм в. с., $h_{взв} = 200$ мм; 9 — песок, $d = 1$ мм, $P_0 = 50$ мм в. с., $h_{взв} = 100$ мм; 10 — шамот, $d = 2,5-5$ мм, $P_0 = 200$ мм в. с., $h_{взв} = 900$ мм

Полученные закономерности справедливы для взвешенного слоя с отношением $h_{взв}/h_{нас} > 3$. «Кипящий» слой с отношением $h_{взв}/h_{нас} < 2$ следует рассматривать как переходное состояние от неподвижного слоя к взвешенному слою. Опыты показывают, что для «кипящего» слоя в пределах высоты от 0 до $h_{нас}$ распределение давлений подчиняется прямолинейному закону, а в пределах от $h_{нас}$ — высоты насыщенного слоя частиц до $h_{взв}$ — статистическому закону (1). Отсутствие

четкого разграничения между «кипящим» и взвешенным слоями наряду с отсутствием достаточных экспериментальных данных, видимо, и являлось причиной противоречивых взглядов на природу образования и структуру взвешенного слоя.

Уральский политехнический
институт
им. С. М. Кирова

Поступило
24 VI 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Д. М. Минц, ДАН, 82, № 1 (1952); 83, № 4 (1952). ² Н. И. Смирнов,
и Де Эп, ЖПХ, 24, № 1—4 (1951).