

# Гидродинамика Неподвижного Слоя Полидисперсного Зернистого Материала

Худойбердиева Н. Ш.<sup>1</sup>

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению гидродинамика псевдооживленного слоя. Отмечено, что общая картина гидродинамика псевдооживленного слоя полидисперсных зернистых материалов отличается от монодисперсных систем, и вместе с этим величина гидродинамика псевдооживленного слоя соответствует с результатами расчетов по уравнениям имеющейся в литературе.

**Ключевые слова:** гидродинамика, псевдооживленный слой, полидисперсные зернистые материалы, кипящий слой, монодисперсных систем, порозность, уравнения.

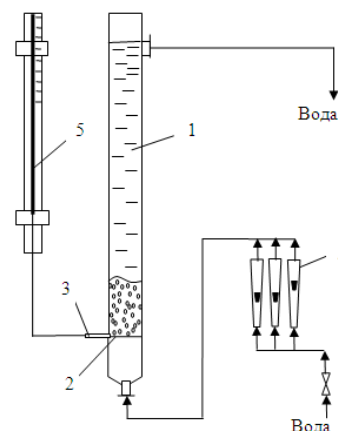
Значение метода псевдооживления особенно велико для проведения тепломассообменных процессов, так как в десятки, а иногда и в сотни раз уменьшает термическое или диффузионное сопротивление по сравнению с процессами, протекающими в условиях неподвижного состояния зернистого материала. Однако, отсутствие точной методики расчета гидродинамики и тепломассообмена в аппаратах со стационарным и кипящим зернистым слоем ограничивает применения псевдооживления в промышленности.

С нашей точки зрения, существенным недостатком многих проведенных ранее исследований является отсутствие эталонной зависимости коэффициента сопротивления от скорости, на основе которой возможно было бы установить влияние формы частиц на величину коэффициента трения. В работе [1], в качестве эталона принято сопротивление слоя, состоящего из одинаковых частиц правильной сферической формы. Такими частицами были выбраны шарики подшипников качения с диаметрами 2, 4 и 5 мм.

Анализ результатов исследований [2] позволило нам легко установить эталонную зависимость, а по ней, на основании подобных же опытов, и численные значения коэффициента формы для частиц разнообразной геометрической формы и различных фракционных составов.

## Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования гидродинамики неподвижного слоя полидисперсных твердых частиц, восходящим потоком жидкости были проведены на опытной установке, схема которой представлена на рис. 1. Основным элементом установки, т. е. рабочим аппаратом являются цилиндрические, стеклянные трубки с внутренним диаметром 20, 22; 36; и 45,1 мм и высотой 1,2 м. Диаметр стеклянных трубок проверяли по объему воды в мерном цилиндре. В качестве рабочего зернистого материала исследованы слои частиц неправильной формы (многие частицы имеют почти овальные формы) гравия, округлых стеклянных частиц, катионита КУ-2-8, и свинцовую дробь. Характеристики исследованных частиц приведены в табл. 1. Объем занимаемой твердыми частицами слоя зернистого материала определяли вытесненной в мерном цилиндре воды. Плотность частиц находили взвешиванием отсчитанных количеств зерен определенного объема и размера.



1 – аппарат; 2 – распределительная решетка; 3 – импульсная трубка отбора давления; 4 - ротаметры; 5 – пьезометр.

Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки.

<sup>1</sup> PhD, доц., Навоийский государственный горный и технологический университет

Распределительная решетка основного аппарата имела щели длиной 4 и шириной 0,2 мм и свободное сечение 5 %. Исследования проведены при фильтрации через слой сыпучего материала водопроводной воды, с температурой 20-25°C. Температуру воды на выходе из аппарата измеряли стеклянным термометром с ценой деления 0,1°C.

Высоту слоя полидисперсных твердых частиц измеряли с помощью шкалы с делением в 1 мм, закрепленной на рабочей трубке. При проведении опытов расход жидкости измеряли ротаметрами, а перепад давления в слое – пьезометрической трубкой и микроманометром. Ротаметров оттарировали измерением количества жидкости, вытекающей из верхнего конца аппарата в мерный сосуд известной емкости с отсчетом по секундомеру времени, необходимой для заполнения последнего. Импульсная трубка для измерения перепада давления в слое располагалась на уровне распределительной решетки под слоем сыпучего материала.

Таблица 1.

№	Зернистый материал	Средний диаметр, $d$ , мм	Насыпная плотность, $\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Порозность, $\varepsilon_0$	Фактор формы, $\Phi$	Коэффициент формы, $\varphi$
1	Гравия	1,3	1460	1840	0,4	0,85	1,4
2		1,98	1440	То же	0,4	0,79	1,6
3		2,54	1330	.....	0,41	0,77	1,7
4		3,04	1300	.....	0,42	0,75	1,8
5	Свинцовая дробь	1,84	6730	11400	0,41	0,88	1,3
6		2,37	6680	То же	0,41	0,82	1,5
7		4,06	6600	.....	0,42	0,73	1,9
8	Катионит КУ-2-8	0,54	720	1380*	0,4	0,95	1,1
9		0,84	710	То же	0,41	0,91	1,2
10	Стеклянные округлые частицы	0,6	1440	2500	0,4	0,82	1,5
11		2,37	1400	То же	0,41	0,75	1,8
12		4,47	1360	.....	0,41	0,66	2,3

\* - в набухшем состоянии.

В рабочую трубку на распределительную решетку сначала засыпали сухих частиц полидисперсного зернистого материала определенным объемом и измеряли высоту неподвижного слоя зернистого материала для определения порозности слоя. Объем занимаемый частицами определенной порции заранее определяли по увеличению объема воды в мерном цилиндре. Потом аппарат медленно заполняли водой и повторно проверяли высоту неподвижного слоя, находящегося в покоящейся жидкости. После этого с помощью игольчатого вентиля устанавливалась необходимая рабочая скорость жидкости, при которой измерялись необходимые параметры. Перепад давления в слое полидисперсного зернистого материала замерялось пьезометрической трубкой как при увеличении скорости оживающего потока, так и при её уменьшении. Скорости оживающей среды в аппаратах изменяли от 0 до 1,0 м/с, а высоту неподвижного слоя зернистого материала от 50 до 250 мм.

#### Обработка опытных данных и определение необходимых параметров проведены в следующей порядке

1. Эквивалентный диаметр частиц определяли по данным рассева материалов на фракции следующим образом. Если смесь сыпучего материала представляет собой узкую фракцию (например, проходящую через сито с размером ячейки  $d_1$ , но остающуюся на сите с ячейкой  $d_2$ , близкой по величине к  $d_1$ ), то определяющий размер частиц – их эквивалентный диаметр  $d_3$  (равный в данном случае, диаметру узкой фракции смеси  $d_1$ ), приняли равным среднему геометрическому из размеров ячеек смежных сит:

$$d_3 = (d_1 \cdot d_2)^{0,5}, \text{ м} \quad (1)$$

Заметим, что для узкой фракции интервал дисперсности зерен  $\eta = d_{\text{макс}}/d_{\text{мин}} < 2$  и среднегеометрической и среднеарифметической определяющие размеры весьма близки. Дисперсность частиц неправильной формы при обычных методах рассева фактически колеблется вокруг номинального среднего размера  $\pm 30\%$  [2,3].

При использовании широких фракций величину эквивалентного диаметра, т.е. определяющего размера частиц вычисляли по формуле:

$$d = 1 / \sum(x_i/d_i), \text{ м} \quad (2)$$

где  $x_i$  - объемная доля частиц данной фракции с диаметром  $d_i = 0,5(d_1 + d_2)$ ;

$d_1$  и  $d_2$  – соответственно, меньший и больший размеры частиц данной фракции, м.

2. Порозность (доля свободного объема) неподвижного слоя полидисперсного зернистого материала определяли по формуле

$$\varepsilon_0 = (V_{\text{сл}} - V_{\text{ч}}) / V_{\text{сл}} \quad (3)$$

где  $V_{\text{сл}}$  – объем слоя зернистого материала, м<sup>3</sup>;

$V_{\text{ч}}$  – объем, занимаемый твердыми частицами,  $\text{м}^3$ .

3. Фиктивную (отнесенная к полному поперечному сечению аппарата) [6,8]. скорость оживающего агента (воды) вычисляли из уравнения расхода

$$w = V_{\text{с}}/S, \text{ м/с} \quad (4)$$

где  $V_{\text{с}}$  – объемный расход оживающего агента,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$S$  – площадь поперечного сечения аппарата (трубки),  $\text{м}^2$ ;

4. Экспериментальное значение гидравлического сопротивления слоя

$$\Delta p_{\text{с}} = 9,81 \cdot h_{\text{пз}}, \text{ Па} \quad (5)$$

где  $h_{\text{пз}}$  уровень оживающего агента в пьезометрической трубке, м.

5. Порозность псевдооживленного слоя полидисперсного зернистого материала

$$\varepsilon = 1 - (H_0/H)(1 - \varepsilon_0) \quad (6)$$

где  $H_0$  и  $H$  – соответственно, высота неподвижного и псевдооживленного слоев, м;

$\varepsilon_0$  – порозность неподвижного слоя зернистого материала.

6. Расчетное значение гидравлического сопротивления псевдооживленного слоя

$$\Delta p = Hg(\rho_{\text{ч}} - \rho)(1 - \varepsilon) \quad (7)$$

где  $H$  – высота псевдооживленного слоя, м;

$\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho$  – плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\varepsilon_0$  – порозность слоя зернистого материала.

Нами были проведены опыты с двенадцатью образцами различных зернистых материалов. С целью увеличения степени неоднородности слоя, характеризующейся отношением  $\eta = d_{\text{max}}/d_{\text{min}}$ , опыты проведены также с бинарными слоями, которые состояли из частиц различного материала и плотности, поскольку таких слоев примыкают к полидисперсным [4].

В большинстве исследований, посвященных установлению зависимости между перепадом давления и свойствами слоя и оживающей среды, опыты проводили с большими отношениями диаметра аппарата к диаметру монодисперсных зерен ( $D/d > 20$ ). В то же время при проведении экзотермических гетерогенно-каталитических реакций с большими тепловыми эффектами, часто применяются трубчатые контактные аппараты, в которых катализатор загружается в трубы диаметром не более 30 мм. Кроме того, в последнее время зернистый материал начали применять в качестве промежуточного теплоносителя для интенсификации теплопереноса и предотвращения отложения накипи в трубчатых теплообменных аппаратах [5,7]. Использование труб малого диаметра и большой длины (высоты) дает возможность приблизиться к изотермическим условиям ведения процесса. Поэтому большой практический интерес представляет исследование гидравлического сопротивления слоя полидисперсных зернистых материалов в трубах малого диаметра в диапазоне отношения диаметра аппарата к диаметру частиц  $D/d = 2 \dots 20$  (рис. 2).

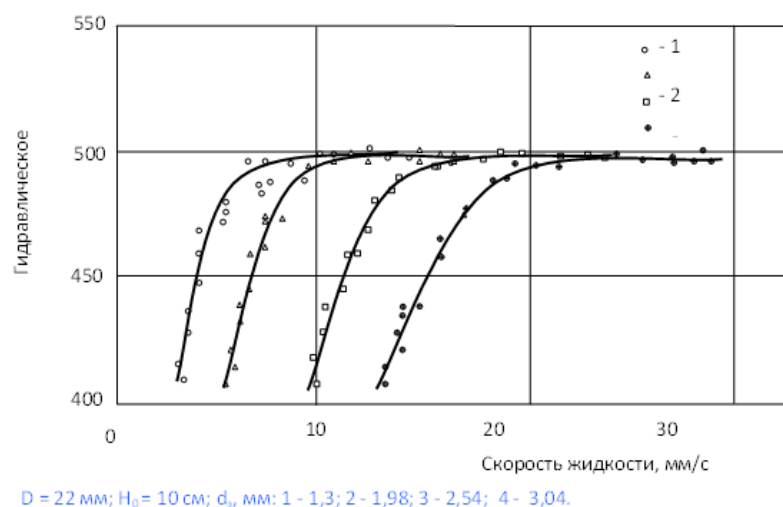


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления слоя гравия от скорости воды

## Вывод

Обработка опытных данных по гидравлическому сопротивлению слоя в логарифмической системе координат позволяла четко выявить особенности поведения полидисперсного слоя при его оживлении жидкостью.

Анализ полученных результатов позволяла выявить наиболее характерные особенности полидисперсного слоя и его отличие от монодисперсного слоя:

- a) существование переходного режима между областями фильтрации и псевдооживления (в монодисперсном слое такой области не существует);
- b) наличие двух характерных скоростей:  $w_n$  - начальной скорости переходного режима и  $w_k$  - критической скорости псевдооживления.

Гидравлическое сопротивление в области неподвижного слоя возрастает с увеличением скорости оживающей среды, а в псевдооживленном слое оно остается практически постоянным.

## Литература

1. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах с завихрителями. // Теплофизика высоких температур. – Москва, 2003. Т.41. - № 4. – С. 587-633.
2. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. - Л.: Химия, 1968. - 512 с.
3. *Интенсивность теплообмена в выхревой сушилке. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Суярова Х.Х., Файзуллоева С.С. Журнал «Universum: технические науки» 6(87)-г. Москва, 2021г., июнь.*
4. *Закиров С. Г., Бахронов Х.Ш., Туйбойов О.В., Худойбердиева Н.Ш., Исследование теплоотдачи от внутренней стенки трубы к слою полидисперсного зернистого материала псевдооживленному водой. Журнал «Химическая технология. Контроль и управление». -Ташкент, 2016. -№ 4, -С. 15–18.*
5. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш. Intensity of Heat Transfer in a tube with a Fluidized layer of a Polydisperse Granular material. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 1, January-2017, ISSN 2229-5518/1482-1485 pages.
6. *Худойбердиева Н.Ш., Худойкулова С.В., Худойкулова Г.В. Изучение расширения псевдооживленного слоя полидисперсного зернистого материала.*
7. Бахронов Х.Ш., Худойбердиева Н.Ш., Юнусова С.Т. Liquefaction of solid particles of polydispersed grained material. International Journal of integrated education ISSN:2620-3502 (E)/2615-3785(P). Vol.3 №10, Oct. 2020, Indonesia.
8. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдооживления. - М.: Химия, 1968. - 664 с.