

А. П. Белоусов, П. Я. Белоусов

(Новосибирск)

ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ В ШАРОВЫХ ЗАСЫПКАХ

Обсуждается новый оптический метод изучения течений в регулярных структурах из оптически прозрачных шаров, основанный на использовании элементов такой структуры в качестве сложного объектива. Возникающая в системе дисторсия исправляется симметричным расположением входного зрачка относительно оптической системы.

Шаровые засыпки широко применяются в современной технике [1]: в теплообменниках, конденсаторах, фильтрах, химических реакторах. С задачами движения жидкости в пористой среде сталкивается нефтедобывающая промышленность. Понимание процессов, происходящих при движении жидкости через пористую среду, позволяет оптимизировать режимы работы разнообразных устройств, использующих засыпки.

Изучение течений в засыпках оптическими методами затруднено из-за влияния границ раздела на распространение зондирующих световых пучков и пучков, формирующих изображение исследуемых областей потоков.

На практике влияние границ раздела на распространение световых пучков устраняется иммерсионными жидкостями, имеющими показатель преломления, равный показателю преломления материала засыпки. В этом случае световые пучки не преломляются на границе раздела и на качество передачи световых пучков влияет только осаждение примесей, частиц и пузырьков на элементы засыпки. Однако применение иммерсионных жидкостей не решает всех проблем при исследовании потоков, например газовых потоков в засыпках.

В данной работе предложен оптический метод исследования потоков, основанный на рассмотрении шаровой засыпки как сложной оптической системы с известными свойствами.

Простейшим и важнейшим фрагментом регулярной шаровой засыпки является система из двух шаров (рис. 1). Если шары соприкасаются, а опорные плоскости совпадают с вершинами преломляющих поверхностей, то лучевая матрица такой оптической системы выразится в виде [2]:

$$M_1 = \begin{bmatrix} \frac{n^2 - 8n + 8}{n^2} & -4 \frac{R(n-2)}{n^2} \\ 4 \frac{(n-2)(n-1)}{Rn^2} & \frac{n^2 - 8n + 8}{n^2} \end{bmatrix},$$

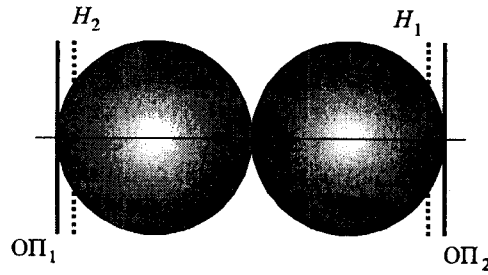


Рис. 1. Положение фокусов и главных плоскостей оптической системы фрагмента шаровой засыпки. ОП₁ и ОП₂ – опорные плоскости, H₁ и H₂ – главные плоскости, F₁ и F₂ – фокальные точки

где n – показатель преломления материала шаров, а R – радиус шаров (радиусы шаров приняты равными, показатель преломления окружающей среды считается равным 1). Фокусное расстояние такой оптической системы

$$f = f' = -\frac{1}{4} \frac{Rn^2}{(n-2)(n-1)}.$$

Первый фокус системы находится на расстоянии l_1 от ОП₁:

$$l_1 = \frac{1}{4} \frac{(n^2 - 8n + 8)R}{(n-2)(n-1)}.$$

Первая главная точка находится на расстоянии l_2 от ОП₁:

$$l_2 = -2 \frac{R}{n-2}.$$

Второй фокус расположен на расстоянии l_3 от ОП₂:

$$l_3 = -\frac{1}{4} \frac{(n^2 - 8n + 8)R}{(n-2)(n-1)}.$$

Вторая главная точка расположена на расстоянии l_4 от ОП₂:

$$l_4 = 2 \frac{R}{n-2}.$$

Эти характеристики при $n = 1,478$ и $R = 9$ мм (для стекла ЛК-7) имеют значения (мм): $l_1 = 14,78$, $f = f' = 19,69$, $l_2 = 34,48$, $l_3 = -14,78$, $l_4 = -34,48$.

Если предметная плоскость совпадает с ОП₁, то такая система строит изображение предмета на расстоянии l_5 от ОП₂:

$$l_5 = 4 \frac{R(n-2)}{n^2 - 8n + 8}.$$

При $n = 1,478$ и $R = 9$ мм изображение предмета расположено на расстоянии $l_5 = 11,46$ мм от вершины второго шара.

Для того чтобы построить изображение объектов, находящихся в предметной плоскости, используются камерные объективы или окуляры.

Выходной зрачок рассматриваемой оптической системы совпадает с входным зрачком окуляра или объектива. В этом легко убедиться, проанализировав оптическую систему. Положение входного зрачка комплексной системы определяется положением входного зрачка камерного объектива относительно ОП₂. Поэтому расстояние l_6 от ОП₁ до входного зрачка оптической системы выражается в виде

$$l_6 = -\frac{R(yn^2 + 8R - 8yn + 8y - 4nR)}{8y - 12yn + 4yn^2 - 8nR + 8R + n^2R},$$

где y – расстояние от ОП₂ до входного зрачка камерного объектива. В случае, если объектив расположен на расстоянии 500 мм от ОП₂, $l_6 = -14,03$ мм.

Размер входного зрачка определяется коэффициентом линейного увеличения для пары сопряженных плоскостей, совпадающих с входным и выходным зрачками рассматриваемого фрагмента засыпки из двух шаров:

$$d_{\text{вых.зр}} = Ad_{\text{вх.зр}},$$

где A – коэффициент линейного увеличения. Следовательно,

$$d_{\text{вх.зр}} = D/A,$$

где D – диаметр входного зрачка камерного объектива;

$$A = \frac{Rn^2 + 4yn^2 - 8Rn - 12yn + 8R + 8y}{Rn^2}.$$

Для $y = 500$ мм, $n = 1,478$ и $R = 9$ мм получаем $A = -26,13$ мм, $D_{\text{max}} = 40,7$ мм. Таким образом, размер входного зрачка $d_{\text{вх.зр}} = 1,53$ мм.

Расчеты показывают, что входной люк системы расположен на расстоянии

$$x_1 = -\frac{R(n-4)}{3n-4}$$

от ОП₁. Величина $x_1 = -52,3$ мм для $n = 1,478$ и $R = 9$ мм.

Диаметр входного люка

$$d_1 = \left| \frac{2R}{A} \right| = \left| \frac{2Rn^2}{4-3n} \right|.$$

Значение $d_1 = 90,6$ мм для $n = 1,478$ и $R = 9$ мм.

Таким образом, угловое поле зрения системы

$$2\omega = 2\arctg \frac{1}{2} \left(\frac{d_1}{x_1 + l_5} \right),$$



Рис. 2. Изображение масштабно-координатной сетки (размер квадрата 1×1 мм)

где l_5 – положение входного зрачка относительно вершины первого шара.
 Величина $2\omega = 68,66^\circ$ для $d_1 = 90,6$ мм и $l_5 = 11,46$ мм, а линейное поле

$$z = 2xtg\omega = 19,16 \text{ мм.}$$

С целью проверки качества работы фрагмента засыпки из двух шаров был использован тест-объект в виде сетки (рис. 2). Из рисунка видно, что в таких системах присутствует дисторсия. Данный тип aberrаций вреден для оптических систем, поскольку он искажает изображение предметов. Например, результаты измерения скорости по трекам будут сильно отличаться от реальных значений.

На основании этих экспериментальных данных можно вычислить значение дисторсии:

$$\text{Dist}(\%) = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 \%,$$

где l_0 – расстояние между метками в параксиальном приближении в плоскости изображения, а l – видимое расстояние между метками.

На рис. 3 сравниваются экспериментальные результаты дисторсии и результаты численного моделирования при помощи программы OSLO 6.01 LT.

Известно, что дисторсия может быть значительно уменьшена симметричным расположением входного зрачка относительно элементов оптической системы. Положение зрачка может регулироваться при помощи коллек-

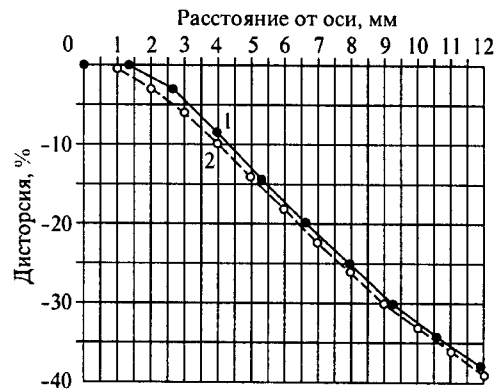


Рис. 3. Дисторсия объектива, состоящего из двух шаров: эксперимент (кривая 1), численное моделирование (кривая 2)

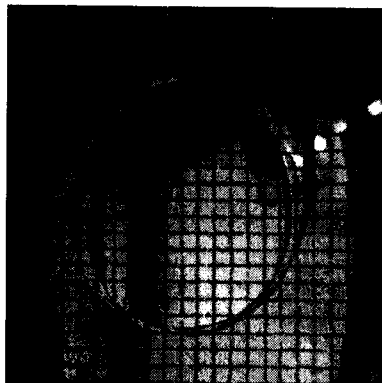


Рис. 4. Изображение тестового объекта, сформированное фрагментом шаровой засыпки с коллективом (расстояние между штрихами 0,5 мм)

тива, установленного в плоскости промежуточного изображения. Расчеты показывают, что применение коллектива с фокусным расстоянием

$$f_1 = \frac{a[l_5 n - 2(R + l_5)]}{n(l_5 + a) - 2(R + l_5 + a)}$$

(где a – расстояние от плоскости изображения до плоскости ОП₂) смещает входной луч в точку касания шаров, при этом дисторсия существенно уменьшается (рис. 4). Величина $f_1 = 41,99$ мм для $a = 488,54$ мм и $l_5 = 11,46$ мм.

Численные расчеты, проведенные для такой системы, показывают, что значение дисторсии на краю поля не превышает 0,78 %. На рис. 5 приведена картина течения в шаровой засыпке при расходе 2мл/с (пленочное обтекание точки контакта шаров).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности исследования оптическими методами течения жидких и газовых сред в засыпках без применения иммерсионных жидкостей. Регулярная шаровая засыпка описывается набором оптических элементов, имеющих известные оптические свойства. Простейший элемент оптической схемы – фрагмент засыпки из двух шаров – является оптической системой, выполняющей перенос изображения из области контакта фрагментов в удобную для наблюдения плоскость. При этом дисторсия исправляется простыми средствами. Остаточная дисторсия для поля зрения в несколько десятков градусов (для крупных шаров засыпки из крона $n \approx 1,47$ и $R = 9$ мм) не превышает 0,78 %. Линейное поле зрения оптической системы при этом, как видно из рис. 6, соответствует диаметру шаров засыпки. Следовательно, вся область засыпки между шарами может быть исследована оптическими средствами без существенного ис-



Рис. 5. Вихревая структура в шаровой засыпке

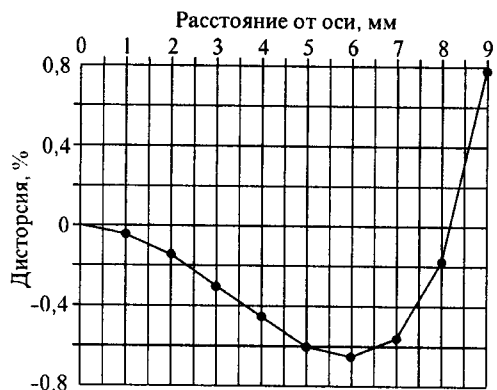


Рис. 6. График относительной дисторсии оптической системы, состоящей из двух шаров диаметром 9 мм ($n = 1,478$) и корректирующего коллектива

кажения масштабов. Для измерения динамических и структурных характеристик могут быть использованы методы PIV (Particle Image Velocimetry), лазерные доплеровские измерительные технологии, методы визуализации и т. п.

Авторы выражают благодарность Д. М. Марковичу и Ю. Н. Дубнищеву за полезные обсуждения и поддержку при выполнении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1978.
2. Джеррард А., Берг Дж. М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978.

Институт теплофизики СО РАН,
E-mail: belousov@laser.itp.nsc.ru

Поступила в редакцию
11 февраля 2003 г.