

УДК 66.096.5

К.Г. АНИСИМОВ, В.И. ВОЛКОВ

Исследование структуры давления внутри зернистого слоя

Измерению давления в упаковках посвящено обширное количество работ, что обусловлено прежде всего требованиями производства различной химической продукции, получаемой в результате прогонки жидкости или газа через плотные слои упаковок. Величину перепада давления и соответствующего гидравлического сопротивления необходимо закладывать в расчет проектируемых реакторов. Кроме того, знание локального распределения давления внутри упаковки позволяет прогнозировать соответствующие процессы переноса тепла и массы внутри зернистого слоя.

Для измерения пристеночного перепада давле-

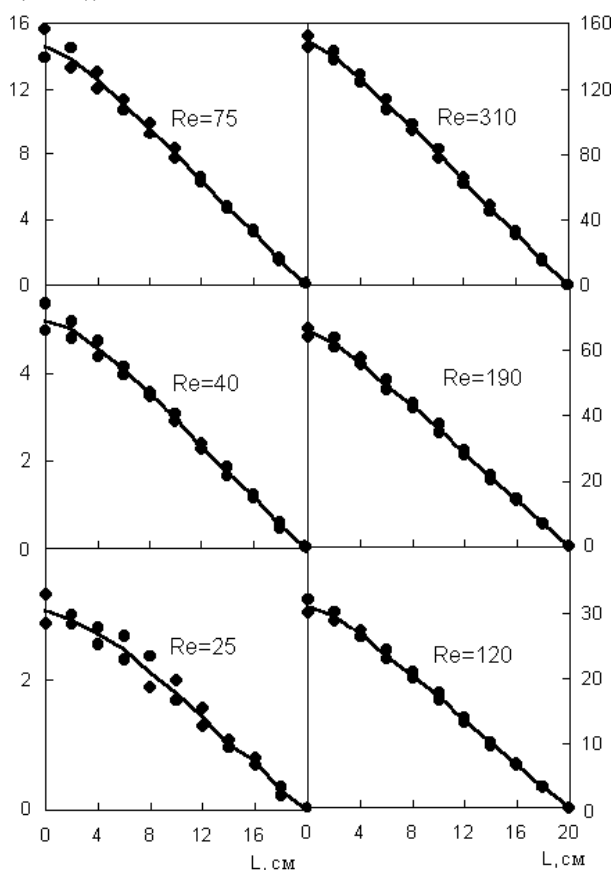


Рис. 1. Распределение пристеночного перепада давления (см водн. ст.) по длине хаотичной упаковки (см) из шариков диаметром 3 мм при различных числах Рейнольдса

ния в хаотичном упакованном слое из шариков диаметром 3 мм использовали горизонтальный опытный участок длиной 20 см и диаметром 5 см. На опытный участок устанавливали специально изготовленный многоканальный жидкостный ма-

нометр, с помощью которого определяли давление на стенке упаковки одновременно в 36 точках, находящихся в 9 сечениях, в каждом из которых имелось 4 измерительных точки. Измерительные сечения располагались на расстояниях 2 см по длине упаковки, кроме того, давление фиксировали за и перед упаковкой [1-3]. Точность измерения давления составляла 0,5 мм водного столба. Измерения перепада давления в одной упаковке проводились многократно, в среднем 9 раз для одного числа Re. Результаты измерений при переупаковках усреднялись. Экспериментальные данные по измерению пристеночного перепада давления для упакованного слоя из шариков диаметром 3 мм представлены на рисунке 1. Как видно из графиков, имеет место нелинейность распределения перепада давления, простирающаяся практически по всей длине упаковки, которая почти в 70 раз превышает диаметр шарика, и уменьшающаяся с повышением числа Re. Переход кривых давления от нелинейной зависимости к линейной происходит в диапазоне чисел Re от 100 до 300, т. е. в переходной области течения для засыпок [4] (число Re строилось по расходной скорости в пустом канале и эквивалентному диаметру шариков засыпки). Было сделано предположение, что на подобное поведение зависимости перепада давления от числа Re влияют входные эффекты, связанные с диффузией давления внутри упакованного слоя, выравнивание которого по сечению происходит достаточно медленно из-за вихревой структуры потока в зернистом слое. В связи с этим возникла необходимость получения надежных данных по измерению давления не только по длине упакованного слоя, но и по его сечению, что необходимо и для адекватного построения теории движения жидкости через зернистый слой. Такие эксперименты практически отсутствуют в известной научной литературе.

Для измерения распределения статического давления внутри хаотичной засыпки из шариков диаметром 3 мм были изготовлены девять датчиков, один из которых представлен на рисунке 2. На стальную иглу 1 диаметром 0,8 мм, заглушенную с одной стороны, надевалось два или четыре шарика 2 диаметром, близким к диаметру упаковки. Это уменьшало возможные искажения в геометрии упаковки, возникающие при внесении датчиков внутрь зернистого слоя. Между последними шариками в игле с одной стороны продельвалась прорезь 3 (рис. 2) шириной не более 0,3 мм.

Датчики вставлялись изнутри участка в отверстия стенки по две штуки в четырёх сечениях на глубине (расстояние от прорези в датчике до стенки участка) $R/2$ и R , где R – радиус участка, с двух других точек в сечении снималось пристеночное давление внутри упаковки. Кроме того, для получения более полной картины распределения давления по сечению проводились измерения на засыпках при размещении датчиков на глубине одного шарика, $R/3$ и $2R/3$.

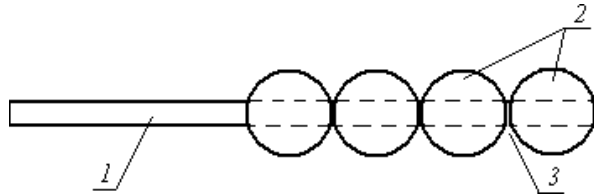


Рис. 2. Датчик для измерения давления внутри засыпки

Предварительные испытания датчиков в пустом канале при ламинарном и турбулентном течениях показали, что с их помощью определяли статическую составляющую давления. Датчик устанавливали в центр канала с потоком и поворачивали вокруг оси. При этом давление, регистрируемое датчиком, не отличалось от давления на стенке канала и не зависело от ориентации щели в датчике к вектору скорости потока жидкости. Измерения давления проводились трехканальным микроманометром ЛПА-4 с точностью 0,2 мм водного столба при гравитационном истечении жидкости через зернистый слой, так как вибрации и пульсации из-за работающего насоса не позволяли проводить измерения с такой точностью. Один из каналов манометра подавался на два измерительных отверстия в стенке опытного участка, два других – непосредственно на датчики, расположенные внутри упаковки. Измерительные сечения располагали на расстоянии 4 см друг за другом, первое сечение – 3 см от начала упаковки. Измерения распределения давления в одной упаковке проводили несколько раз, результаты измерений при переупаковках усредняли. При этом производили не только переупаковки участка, но и поворот каждой засыпки вокруг оси для получения более полных данных по распределению давления в сечении. Результаты экспериментов показали, что давление в упаковке уменьшается от стенки к центру, тем самым имея минимум в центре, причем это уменьшение монотонно возрастает как при удалении от входа засыпки, так и с ростом числа Re .

Для проведения качественного анализа полученных результатов на рисунке 3 для различных чисел Re приведено распределение давления по сечениям, отнесенное к перепаду давления по дли-

не упаковки между данным сечением и отстоящим на 2 см по потоку. Как видно, на распределении давления по сечению нет особых отражений ламинарно-турбулентного перехода и связанных с этим структурных изменений потока, можно отметить лишь рост уменьшения давления в центре упаковки при приближении к турбулентности ($Re = 190$ на рисунке 3), в то время как распределение давления при ламинарном режиме практически одинаково для различных чисел Re .

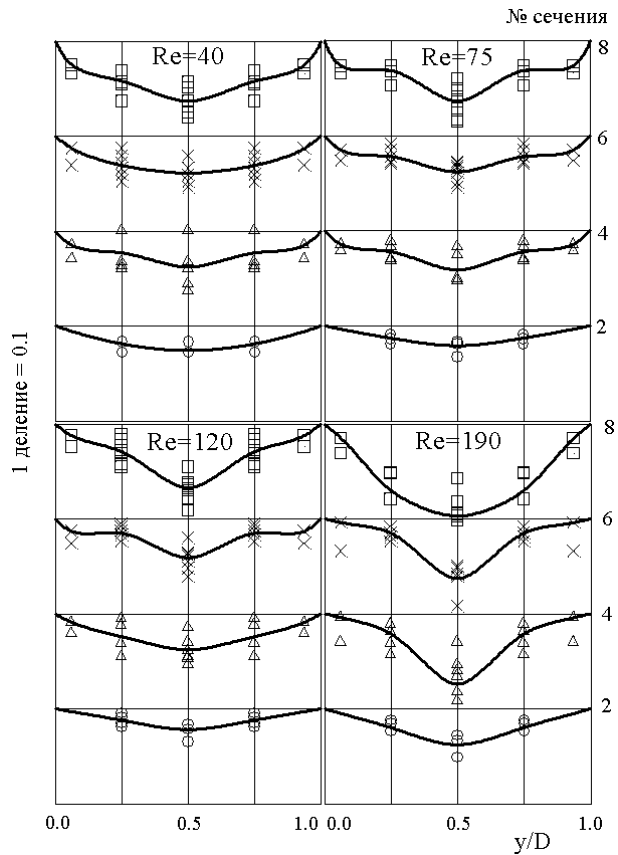


Рис. 3. Распределение давления по сечениям упакованного слоя, отнесенное к пристеночному перепаду давления между данным сечением и отстоящим на 2 см по потоку при различных числах Re (D – диаметр опытного участка)

Полученное распределение давления дает информацию о крупномасштабных проявлениях в характере течения, а именно, о наличии поперечных перетоков жидкости от стенки участка к центру, что связано с неравномерностью проницаемости упакованного слоя по сечению. Действительно, если качественно восстановить поперечную компоненту скорости по градиенту давления, то получится кривая с максимумами между стенкой упаковки и ее центром. Расположение этих максимумов не будет постоянным так же, как и минимум давления по сечению засыпки не всегда наблюдается в центре упаковки. В любом случае

можно говорить о наличии устойчивого потока массы жидкости от стенки участка, который, не достигая центра, поворачивается по потоку в засыпке вблизи центра упаковки, тем самым внося вклад в продольную составляющую скорости. Это позволяет сделать вывод, касающийся работы химических реакторов подобной геометрии, о повышенном поперечном переносе химических реагентов в области, находящейся вблизи половины радиуса упакованного слоя. В центральной области упаковки этот эффект будет менее выражен, так как обращение в ноль поперечной компоненты скорости реализуется, как уже отмечалось, не всегда в центре, на стенке же она всегда равна нулю.

Чтобы оценить корректность измерения давления внутри зернистого слоя, воспользуемся данными по прямому измерению поперечной компоненты скорости внутри зернистого слоя [5]. В работе приводятся средние значения модуля относительной поперечной компоненты скорости (относительно расходной скорости), измеренные вблизи центра струи в широком сечении кубической упаковки для чисел $Re = 22, 63, 112, 260$ и 500 , которые равны $0,08, 0,08, 0,09, 0,1, 0,09$ соответственно. Усреднение всех найденных значений модуля поперечной компоненты скорости по 5-ти сечениям на высоте шарика и по 6-ти

линиям измерения на каждой высоте, а также по всем числам Re дает значение $0,039$. Усреднение по всем сечениям и числам Re полученного нами квадратного корня из отношения перепада давления между стенкой и центром к полному пристеночному перепаду давления всей упаковки приводит к значению $0,071$. Физически очевидно, что поперечная компонента скорости в хаотичной упаковке больше, чем в кубической, поэтому из приведенного сравнения можно сделать вывод о достаточной корректности проведенных измерений.

Вихревая структура потока в упакованном слое, медленно разрушающаяся с повышением числа Re , и неравномерность проницаемости засыпки по сечению, приводящие к неустойчивости движения жидкости в зернистых средах, определяют своеобразие распределения давления внутри упакованного слоя. Проведенное комплексное исследование изменения давления в хаотичной упаковке выявило нелинейность распределения пристеночного давления по всей длине засыпки при низких числах Re , а также уменьшение давления в сечении от стенки к центру упаковки, что позволяет судить об увеличении поперечной компоненты скорости в этой области.

Литература

1. Анисимов К.Г., Волков В.И. Экспериментальное исследование перепада давления для системы связанных вихрей в зернистых средах // Известия АГУ. 1998. №1.
2. Анисимов К.Г., Борозденко Д.А., Волков В.И. Изучение распределения давления в зернистых средах // Проблемы гидродинамики и теплообмена. Барнаул, 1999.
3. Анисимов К.Г., Волков В.И., Мухин В.А. Измерение пристеночного перепада давления в

- упакованных слоях // Проблемы гидродинамики и теплообмена. Барнаул, 1999.
4. Волков В.И., Мухин В.А., Накоряков В.Е. Исследование структуры течения в пористой среде // ЖПХ. 1981. Т. 34.
5. Волков В.И. Исследование гидродинамики и процессов переноса в пористых средах: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / Институт теплофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1982.