

В. А. КИРИЛЛОВ, Ю. Ш. МАТРОС, В. Н. СОРОКИН,
М. А. КАСАМАНЯН, член-корреспондент АН СССР М. Г. СЛИНЬКО

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В СВОБОДНОМ ОБЪЕМЕ СЛОЯ КАТАЛИЗАТОРА

Условия существования ламинарного или турбулентного режима могут в значительной степени определяться длиной затухания начальных возмущений. При одинаковых значениях чисел Re , шероховатости омываемой поверхности и начальных возмущениях область существования ламинарного режима расширяется для среды, в которой эти возмущения затухают на меньшей длине. Это может иметь место для неподвижного слоя катализатора, продуваемого жидкостью или газом. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию этого явления.

В основе всех примененных нами экспериментальных методик лежит нестационарный метод, основанный на подаче в поток газа (жидкости) трассера, имеющего отличные от основного потока физические свойства. Это позволяет наблюдать его распространение в пространстве между зернами.

1. Система газ — твердое. Экспериментальное исследование проводилось на двух плоских моделях слоя и одной объемной. Плоские модели представляли собой выполненные из оптического стекла кюветы прямоугольного сечения. Внутри кювет укладывались непрозрачные цилиндры так, что они образовывали характерные элементы зернистого слоя. Кюветы различались своими геометрическими характеристиками и размерами используемых в качестве насадки цилиндров. В первой из них применялись цилиндры диаметром 30 мм и высотой 40 мм, а во второй — 40 и 50 мм соответственно. По длине кюветы располагалось 15—20 цилиндров, а по ширине 8—10. Объемная модель слоя представляла собой колонну квадратного сечения 200×200 мм, в которой укладывались шары диаметром 25 мм. Расположение шаров и пористость соответствовали координационному числу 6. В качестве трассера использовались водород, углекислый газ и дым. Газом-носителем служил воздух. Распространение водорода и углекислого газа в пространстве между зернами изучалось при помощи прибора Karl-Zeiss Jena-80 по методике, описанной в ⁽¹⁾. Движение дыма наблюдалось визуально. Исследования проводились при значениях критерия $Re = 20 \div 1000$.

Было установлено, что в свободном объеме слоя существует проточная зона, в которой газ протекает по извилистым каналам в виде сливающихся и делящихся струй, и непроточная, образующаяся из-за отрыва пограничного слоя и расположенная в окрестности точек контактов частиц. Между зонами устанавливается четкая граница раздела, обусловленная наличием свободного пограничного слоя. Эта граница непрерывно деформируется из-за того, что в непроточной зоне находится вращающийся и пульсирующий вихрь. Частота пульсаций ω прямо пропорциональна линейной скорости u и обратно пропорциональна размеру зерна, так что число Струхала $\omega d / u \approx 0,5$. Количество газа, выбрасываемого во время пульсаций из непроточной зоны в проточную, составляет 0,2—0,3 объема непроточной зоны.

2. Система жидкость — твердое. Экспериментальные исследования проводились на гидrolотке, плоской и объемной кюветах. В качестве плоской модели слоя использовалась одна из описанных выше кювет. Объемная модель слоя представляла собой упаковку из случайно расположенных сфер диаметром 25—30 мм в колонне прямоугольного сечения

150 × 150 мм. Сферы выполнялись из тонкого стекла и для уменьшения оптических искажений заливались водой. Для уменьшения влияния пристеночных эффектов часть сфер разрезалась и приклеивалась к стенкам колонны. Во всех экспериментах со сферами трассером служил водный раствор этилового эфира диэтиламино-*о*-карбоксифенилксантенилхлорида, распространение которого в пространстве между зернами при освещении колонны ультрафиолетовым светом характеризовалось зеленовато-желтым свечением. При освещении колонны широким пучком света исследо-



Рис. 1. Характер течения жидкости в проточной части слоя. Система жидкость — твердое, объемная модель слоя

вались общие закономерности движения жидкости, а узкий пучок света позволял наблюдать локальную гидродинамическую обстановку вокруг частиц в любом сечении слоя (рис. 2).

Экспериментальные исследования на плоской модели и гидродотке проводились при естественном освещении.

В результате проведенных экспериментов установлено, что движение жидкости в пространстве между зернами, так же как и газа, имеет струйный характер. Струи в виде пересекающихся белых полос хорошо видны на рис. 1. Однако в жидкости локальная гидродинамическая обстановка вокруг зерен значительно отличается от описанной выше для газа. Так, при $Re < 100$ в окрестности точек контактов частиц не замечено никакого вихреобразования, посветление или потемнение непроточных зон происходит постепенно, концентрация трассера в них становится близкой к концентрации в проточной части за время порядка d^2 / D сек., что соответствует длительности переходного режима при диффузионном характере обмена в непроточной зоне.

При $Re \approx 200$ в устье непроточной зоны образуется вихрь. Зона в этом случае делится на две части — диффузионную и вихревую (рис. 2). С увеличением числа Re увеличивается объем вихревой части, начинаются интенсивные пульсации границы и при $Re \approx 800$ вихрь занимает весь объем, $\omega d / u \approx 0,5—0,6$. Практически одинаковые результаты были получены на гидролотке, на плоской модели слоя и в колонне.

Найденное различие в поведении непроточной зоны для газа и жидкости при одинаковых значениях критерия Re объясняется различной



Рис. 2. Локальная гидродинамическая обстановка вокруг зерна при $Re = 200$. Система жидкость — твердое, объемная модель слоя

степенью турбулентности набегающего потока. Начальные возмущения, имеющие одинаковый порядок в обоих случаях, в жидкости, из-за меньшей ее скорости, затухают на меньшей длине слоя.

Специальные исследования характера течения жидкости на плоской кювете с турбулизатором на входе в слой частиц позволили сместить область возникновения пульсаций в непроточной зоне до $Re = 10—20$.

Таким образом, экспериментально показано, что для течений в неподвижных засыпках (катализатора) существуют критическое энергетическое число $Re < 10$, ниже которого может быть только диффузионная зона отрыва, и критическое линейное число $Re \approx 800$, выше которого имеет место вихревая зона отрыва. При промежуточных значениях чисел Re гидродинамическая обстановка в непроточной зоне зависит от предистории потока, а вихревой или диффузионный характер зоны отрыва определяется степенью турбулентности потока на входе в засыпку. Для системы жидкость — твердое вероятность существования диффузионной зоны отрыва при промежуточных числах Re гораздо выше, так как внесенные в поток возмущения при малых скоростях жидкости успевают затухнуть до входа в зернистый слой.

Полученные результаты могут быть использованы для построения знаковой модели нестационарных процессов в реакторах с неподвижным слоем катализатора.

Авторы выражают глубокую благодарность М. А. Гольдштику за обсуждение результатов работы.

Институт катализа
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
22 V 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. А. Кириллов, Ю. Ш. Матрос, М. Г. Слинко, Теоретич. основы хим. технол., 5, 2, 226 (1971).