

УДК 532.529

## ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ, ПРОВОДИМЫЕ В ЛОНДОНСКОМ УНИВЕРСИТЕТСКОМ КОЛЛЕДЖЕ

П. Н. РОУ

(Лондон)

Главное направление исследований, проводимых в Лондонском университетском колледже, — выяснение механизма работы химических реакторов с взвешенным слоем. Задача этих исследований заключается в детальном изучении соответствующих физических процессов, что позволило бы разработать адекватную модель реактора. Проверка модели путем изучения химических реакций, осуществляемых в реакторе с взвешенным слоем, представляет собой один из важных этапов работы. Исследования были ограничены случаем псевдооживления газами.

Природа одиночных невозмущенных пузырей достаточно изучена, что дает возможность построить простую модель [1, 2], которая при дальнейшем уточнении может значительно усложниться. Отсутствует необходимая информация относительно двух существенных элементов этой модели. Во-первых, мало изучена скорость массообмена между газом в облаке, окружающем пузырь, и газом в прилегающих участках взвешенного слоя. Во-вторых, нет приемлемого метода расчета для конкретных случаев среднего размера пузырей, распределения по их размерам, изменения размеров с высотой в зависимости от определяющих параметров, таких как скорость газа, размеры частиц, конструкция газораспределительного устройства.

На протяжении последних пяти лет группой сотрудников<sup>1</sup> проводились исследования, направленные на получение этой информации, а также испытания моделей и анализ процесса расслоения твердой фазы. Ниже дается обзор последних результатов.

**1. Газообмен между пузырем и плотной фазой.** На первом этапе исследования проводилось впрыскивание пузырей трассирующего газа в двумерный взвешенный слой с последующим определением скорости изменения концентрации этого газа в пузыре за счет обмена с окружающим газом [3]. Этот простой эксперимент допускает также и теоретический анализ. На втором этапе пузыри трассирующего газа впрыскивали периодически как в двумерные, так и в трехмерные слои при непрерывном отборе проб газа в заданной точке вниз по потоку. Результаты такого эксперимента можно в основных чертах предсказать, исходя из данных первого эксперимента. Заключительный этап представляет собой непрерывное впрыскивание трассирующего газа через данный участок однородной пористой плиты — газораспределительного устройства в обычном трехмерном слое и последующий анализ диффузии этого газа. Первый этап исследования завершен; второй и заключительный — в стадии завершения.

В качестве псевдооживающего агента использовался воздух, в качестве трассирующего газа — гелий. Несколько экспериментов было проведено с использованием фреона как трассирующего газа, обладающего значительно меньшей способностью к диффузии. Двумерный слой высотой 107 см, шириной 36 см и толщиной 1.2 см был заключен между двумя плоскими стеклянными пластинами, разделенными полосками нержавеющей стали.

Газораспределительным устройством служила обладающая однородной проницаемостью пластина из обожженной бронзы толщиной 6.3 мм. Задняя стеклянная пластина была просверлена в четырех местах вдоль верти-

<sup>1</sup> Технический факультет Лондонского университета, отдел химической техники (прим. перев.).

кальной осевой линии на расстоянии 12, 32, 42 и 62 см над газораспределительным устройством; отверстия снабжены металлическими пробками. Трассирующий газ вводился через нижнее отверстие, остальные три служили для отбора проб.

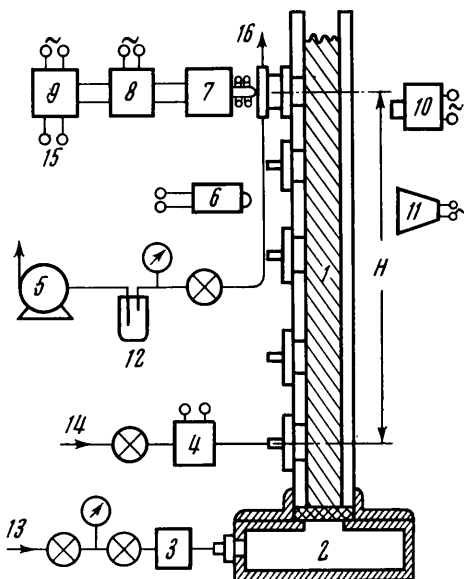
Слой состоял из однородных стеклянных шариков диаметром 165 мк, псевдоожижался увлажненным воздухом при минимальной скорости псевдоожижения 0.040 м/сек (в расчете на полное сечение аппарата). Пузыри гелия вводились периодически при помощи соленоидного клапана, соединенного с электрическим секундомером. В каждый момент времени отбиралась лишь одна проба из одного отверстия, так как отбор газа изменял размер пузыря. Отбор производился в результате замыкания электрической цепи с включенным миниатюрным тарелочным клапаном при поступлении сигнала с фотоэлемента, фиксировавшего приближение пузыря. Анализ проб производился при помощи газовой хроматографии.

Лицевая сторона псевдоожиженного слоя фотографировалась кинокамерой в течение всего процесса отбора проб с целью проверки правильности отбора и определения размеров пузыря и его скорости.

На фиг. 1 представлена схема экспериментальной установки: 1 — псевдоожиженный слой, 2 — газораспределительная решетка, 3 — увлажнитель воздуха, 4 — секундомер и соленоидальный клапан, 5 — вакуумный насос, 6 — фотоэлемент, 7 — соленоидальный привод тарелчатого клапана, 8 — электрический секундомер, 9 — анализатор сигнала фотоэлемента, 10 — 16 мм кинокамера, 11 — подсвечивающие лампы, 12 — сифон, 13 — подвод сжатого воздуха, 14 — подвод гелия, 15 — сигнал от фотоэлемента, 16 — отбор пробы на газовый хроматограф.

Следовало ожидать, что скорость изменения концентрации трассирующего газа в пузыре будет зависеть линейно от разности концентраций и площади поверхности переноса (поверхности пузыря), причем коэффициент пропорциональности — функция числа Рейнольдса. Отсюда вытекает, что логарифм концентрации  $C$  трассирующего газа в пузыре линейно зависит от  $h d_B^{3/2}$  ( $h$  — пройденное пузырем расстояние,  $d_B$  — диаметр пузыря). Эта зависимость показана на фиг. 2 пунктирными линиями; сплошные линии — экспериментальные данные, которые значительно отклоняются от ожидаемых зависимостей.

Это отклонение обусловлено в основном несовпадением точек пересечения теоретических и экспериментальных линий. Последнее связано с наличием существенного и почти мгновенного перемешивания газа в процессе образования пузыря, затем концентрация выравнивается за счет молекулярной диффузии (сопровождаясь турбулентным перемешиванием) в соответствии с теорией. Такое начальное перемешивание играет важную роль в случае малых пузырей, и в описываемых экспериментах наблюдалось практически полное перемешивание в процессе образования пузырей,

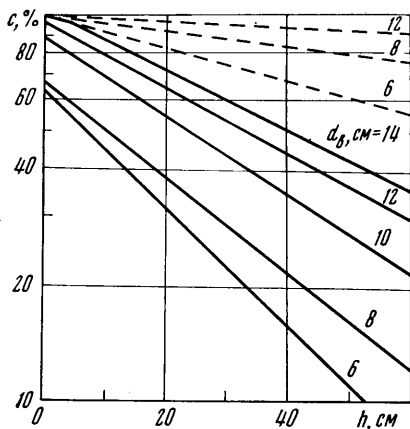


Фиг. 1

когда их размеры были меньше 5 см. С другой стороны, если первоначальный диаметр пузырей был больше 10 см, начальное смещение было несущественным. Отсюда можно сделать важный вывод относительно конструкции газораспределительных устройств: если предпочтительно смещение газа во взвешенном слое, газораспределительное устройство должно приводить к образованию начальных пузырей малых размеров.

В случае периодического впрыскивания пузырей трассирующего газа можно рассчитать средний состав газа в данной точке отбора пробы по известной частоте и времени, в течение которого пузыре обволакивает эту точку. Расчет в основном подтверждается в экспериментах с двумерными и трехмерными слоями, что свидетельствует в пользу правомерности предпринимаемых в дальнейшем попыток анализа случаев, более соответствующих реальной картине.

В последнее время были проведены опыты с трехмерным слоем прямоугольного поперечного сечения  $15 \times 30 \text{ см}^2$ . Газораспределительное устройство, обладающее однородной пористостью, было разделено на 18 квадратов  $5 \times 5 \text{ см}^2$  с независимым подводом газа. Течение было тщательно сбалансировано для достижения полной однородности, но к одному из квадратов был подведен гелий вместо воздуха. Результаты этой работы еще не закончены, однако уже установлены некоторые факты.



Фиг. 2

Эффект начального смещения, который играет важную роль при впрыскивании пузырей, наблюдается и в случае пузырей, произвольно образующихся во взвешенном слое, хотя степень смешения может быть несколько меньшей. Распределение трассирующего газа может существенно зависеть от характера движения частиц твердой фазы. В случае слоя прямоугольного сечения частицы имеют тенденцию к движению вдоль большой оси и вытесняют газ в этом направлении, что приводит к асимметричному распределению трассирующего газа. Когда слой разделили на две части квадратного поперечного сечения, это распределение становилось симметричным, причем скорость размывания трассирующего газа была близка к ожидаемой.

Разумеется, еще многое остается неясным в механизме газообмена между пузырями и плотной фазой, однако по крайней мере был оценен порядок величины скорости обмена, что в ряде случаев достаточно для разработки конструкции реактора.

**2. Слияние пузырей.** Хорошо известно, что газовые пузыри во взвешенном слое легко сливаются и с увеличением расстояния над газораспределительным устройством число пузырей уменьшается, а их размеры возрастают. При этом полный расход газа, проходящего в виде пузырей, остается практически постоянным. На основании наблюдений двумерного взвешенного слоя Тоеи и Мацуно [4] установили простой закон слияния пузырей. В случае пузырей, расположенных почти по вертикали, они сливаются в течение времени  $t_c$ , определяемого соотношением

$$t_c \frac{u_{B1}}{d_{B1}} = f\left(\frac{c}{d_{B1}}, \frac{d_{B1}}{d_{B2}}\right)$$

Здесь  $c$  — расстояние между пузырями в начальный момент времени,  $u_B$  — скорость пузыря,  $d_B$  — его диаметр, индексами 1 и 2 отмечен каждый из пузырей.

Если распространить этот закон на случай естественного образования пузырей в трехмерном слое, то можно полагать, что в среднем  $d_{B1} = d_{B2}$ , и опустить индекс 1. Тогда

$$t_c = \frac{d_B}{u_B} f\left(\frac{c}{d_B}\right) \quad (2.1)$$

Среднее расстояние между пузырями будет меняться обратно пропорционально их концентрации  $N$ . В случае пузырей, расположенных случайным образом или равномерно

$$c \sim (1/N)^{1/a}$$

где  $a = 3$ . Однако в связи с тем, что пузыри движутся по вертикали, наилучшим приближением на практике оказывается значение  $a \approx 1$ .

Скорость слияния пузырей обратно пропорциональна времени слияния, поэтому можно записать

$$-\frac{dN}{dt} = -u_B \frac{dN}{dh} \sim \frac{1}{t_c} = \frac{u_B}{d_B} f(Nd_B) \quad (2.2)$$

Здесь  $h$  — расстояние по вертикали от газораспределительного устройства.

Соответствующая (2.2) эмпирическая формула

$$-d_B \frac{dN}{dh} = K(Nd_B)^p \quad (K = \text{const}) \quad (2.3)$$

при  $p \approx 1.6$  хорошо описывает многочисленные данные разных авторов [5].

Чтобы проинтегрировать уравнение (2.3), необходимо выразить диаметр пузыря  $d_B$  через число  $N$  пузырей в единице объема. С этой целью используем четыре известных соотношения.

Из двухфазной теории следует:

$$nV_B = A(u - u_*) \quad (2.4)$$

где  $n$  — частота движения пузырей,  $V_B$  — средний объем пузыря,  $A$  — площадь поперечного сечения взвешенного слоя,  $u$  — скорость газа в расчете на полное сечение слоя,  $u_*$  — значение  $u$ , соответствующее началу псевдооживления.

Частота движения пузырей и их концентрация связаны соотношением

$$N = n / u_B \quad (2.5)$$

Зависимость скорости пузыря от его размера имеет вид [6]

$$u_B = K_u d_B^{1/2} \quad (K_u = \text{const}) \quad (2.6)$$

Наконец, диаметр и объем пузыря связаны зависимостью

$$V_B = k_v d_B^q \quad (k_v = \text{const}) \quad (2.7)$$

где  $q = 3$  для трехмерных пузырей правильной формы.

Теперь результат интегрирования уравнения (2.3) можно записать в виде

$$N(h + h_0)^r = f(u - u_*), \quad r = \frac{q + 1/2}{(q - 1/2)(p - 1)} \quad (2.8)$$

Здесь постоянная интегрирования  $h_0$  представляет собой расстояние, отсчитываемое по вертикали вниз от газораспределительного устройства, на котором экстраполированный диаметр пузыря равен нулю. Таким образом, величина  $h_0$  связана с конструкцией газораспределительного устройства, определяющей начальный размер пузырей.

Соотношение (2.8) может оказаться весьма полезным, если удастся подтвердить его экспериментально и определить ряд эмпирических постоянных.

**3. Наблюдения структуры взвешенного слоя путем просвечивания рентгеновскими лучами.** Просвечивание взвешенного слоя рентгеновскими лучами, в принципе, дает возможность наблюдать очертания пузыря. Это очень хороший метод получения информации, необходимой для проверки соотношения (2.8), так как здесь отсутствуют возмущения внутренней структуры слоя. Однако практическое применение этого метода представляет собой сложную задачу, если просвечивать слои реальной толщины. Рентгеновы лучи сильно поглощаются химическими элементами, атомные числа которых больше двадцати, но даже в случае легких элементов необходимы высокие напряжения для получения достаточно жесткого излучения, проникающего на глубину, большую нескольких сантиметров. Кроме того, необходима высокая плотность тока для фотографирования пузырей, движущихся со скоростями приблизительно метр в секунду.

Описываемая ниже установка<sup>1</sup> дала удовлетворительные результаты.

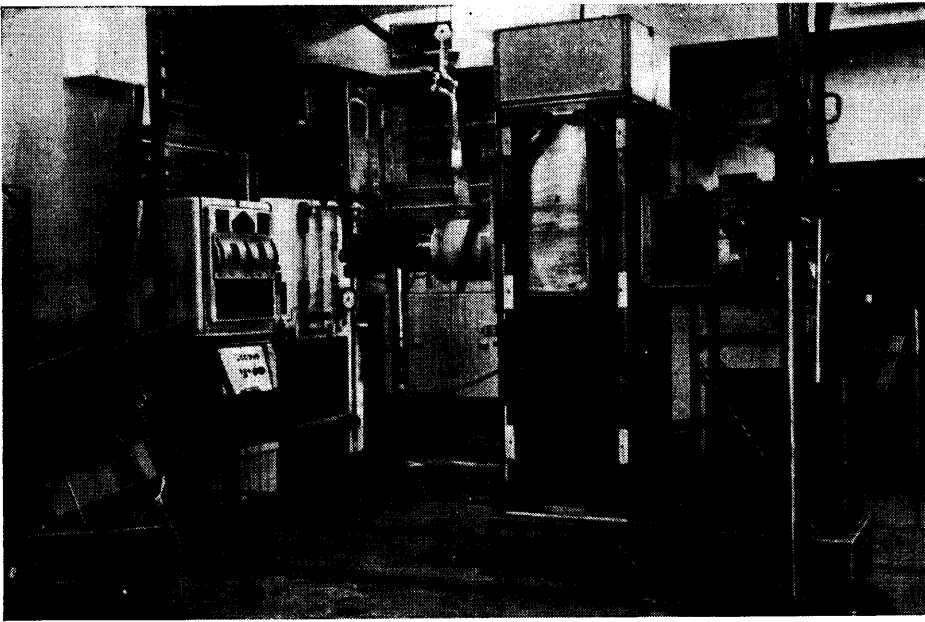
Генератором служила установка, предназначенная для медицинской диагностики, обеспечивающая при постоянном напряжении максимум 132 кВ, фактически без пульсаций. В качестве рентгеновской трубки использовалась система Machlett Super Dynamaх 125 с вращающимся анодом и регулируемой фокусировкой. Система допускала нагрузку 200 ма при узкой фокусировке и 500 ма при широкой фокусировке в течение 0.01 сек при максимальном напряжении.

Излучение, прошедшее сквозь слой, усиливалось при помощи усилителя системы Mullard диаметром 22 см, в результате чего интенсивность возрастала в 3000 раз. На выходе усилителя получали изображения, доступные непосредственному наблюдению, киносъемке или передаче на телевизионный экран. Киносъемка производилась специально приспособленной кинокамерой Vinten F-95 на пленке шириной 70 мм. Эта кинокамера имеет электрическое управление, она приводилась в действие импульсом рентгеновского излучения для съемки лишь двух последовательных кадров со скоростью 6 или 8 кадров в секунду.

Стенки колонны с взвешенным слоем были сделаны из алюминия и имели прямоугольную форму в плане, так что путь рентгеновского луча был одинаков во всем поле зрения. Вся колонна была экранирована свинцом для защиты от рассеянного излучения. На фиг. 3 приведена фотография установки, на фиг. 4 — ее схема: 1 — псевдооживленный слой, 2 — газораспределительная решетка, 3 — источник рентгеновских лучей, 4 — коллиматор, 5 — усилитель изображения, 6 — призмный прибор, 7 — кинокамера, 8 — телекамера, 9 — телевизор, 10 — контрольные приборы, 11 — секундомер, 12 — генератор, 13 — реле времени запаздывания, 14 — подвод увлажненного воздуха (расход фиксируется), 15 — подвод сжатого воздуха, инъецируемого в слой в виде пузырей, 16 — окно визуального наблюдения. На фиг. 5 дана типичная фотография, сделанная в рентгеновских лучах.

<sup>1</sup> Более подробное описание установки дано в диссертации: Everett D. J. An X radiological study of bubbles in gas fluidised particles. Ph. D. thesis. London Univ., Aug., 1970.

На этой установке было проведено, в частности, исследование ряда материалов, используемых в качестве твердой фазы (в скобках указан средний диаметр частиц): алюминиевый катализатор (210  $\mu\text{к}$ ), уголь (296  $\mu\text{к}$ ), кварцевый песок (135  $\mu\text{к}$ ), стеклянные шарики (323  $\mu\text{к}$ ), дробленое стекло (268  $\mu\text{к}$ ). Испытывались слои высотой 70 см в колонне сечением



Фиг. 3

30 × 20  $\text{см}^2$ . Газораспределительным устройством служила пористая плита. Псевдооживление производилось увлажненным воздухом. Наблюдения в рентгеновских лучах велись на разных высотах над газораспределительным устройством и при разных скоростях псевдооживления: от 1.5  $u_*$  до 6  $u_*$ , где  $u_*$  — скорость начала псевдооживления. Предварительные наблюдения заключались в подсчете числа  $N'$  всех пузырей в некотором выделенном объеме и в измерении их диаметров  $d_v$ . Выделенный объем представлял собой прямоугольный параллелепипед высотой 8 см, шириной 15 см (отсчет от центральной линии) и толщиной 20 см (отсчет в направлении от лицевой стенки к задней). За диаметр пузыря принималась его максимальная ширина. Было проанализировано более 5000 кадров и более 10 000 пузырей.

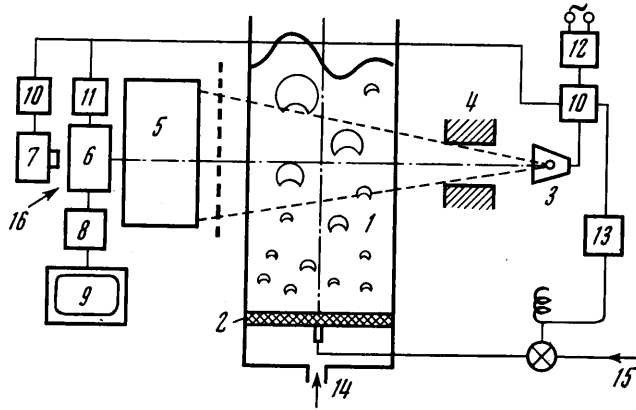
Для каждой серии наблюдений определялся средний диаметр пузыря по выделенному объему

$$d_v = \left( \sum d_v^3 / N' \right)^{1/3}$$

Результаты представлены на фиг. 6 в виде зависимости среднего по объему диаметра пузыря  $d_v$  от высоты  $h$  для слоя 30 × 20  $\text{см}^2$  или 30 × 30  $\text{см}^2$  алюминиевого катализатора (а), дробленого угля (б), кварца (в), стеклянных шариков (г) и стеклянной пудры (д); цифры у кривых отмечают отношение скорости псевдооживляющего воздуха в опыте к скорости начала псевдооживления. Видно, что величина среднего диаметра линейно

растет с высотой, причем скорость роста разная для разных материалов. Зависимость от скорости газа носит более сложный характер; при этом сказывается также и влияние высоты.

Из уравнения (2.8) следует, что вместо размеров пузырей целесообразнее рассматривать их концентрацию. Последняя показана на фиг. 7 в виде зависимости числа пузырей  $N'$  в объеме  $8 \times 15 \times 20 \text{ см}^3$  или  $8 \times 15 \times 30 \text{ см}^3$  слоя от высоты  $h$ . (Обозначения те же, что и на фиг. 6.)



Фиг. 4

Из соотношений (2.4) — (2.7) можно заключить, что для каждого материала

$$N' d_B^{q+1/2} / (u/u_* - 1) = \text{const} \quad (3.1)$$

После обработки результатов опытов было установлено, что соотношение (3.1) справедливо лишь при  $q \approx 2.5$ . На первый взгляд этот вывод кажется несколько неожиданным, но он просто означает, что форма пузырей меняется с изменением их размера. Крупные пузыри имеют более плоскую форму, что подтверждается подробным изучением фотографий пузырей.

Можно ожидать, что если газораспределительным устройством служит пористая плита, то начальный размер пузырей будет пренебрежимо мал и следует положить  $h_0 = 0$  в уравнении (2.8). С учетом этого обстоятельства была проведена дальнейшая обработка экспериментальных данных. В результате было установлено, что они хорошо описываются соотношением

$$N' h^2 (u - u_*) = \text{const} \quad (3.2)$$

Если  $r = 2$ ,  $q = 2.5$ , то из соотношения (2.8)  $p \approx 1.7$ . В пределах точности эксперимента это значение совпадает со значением  $p$ , соответствующим другим данным (см. [5]).

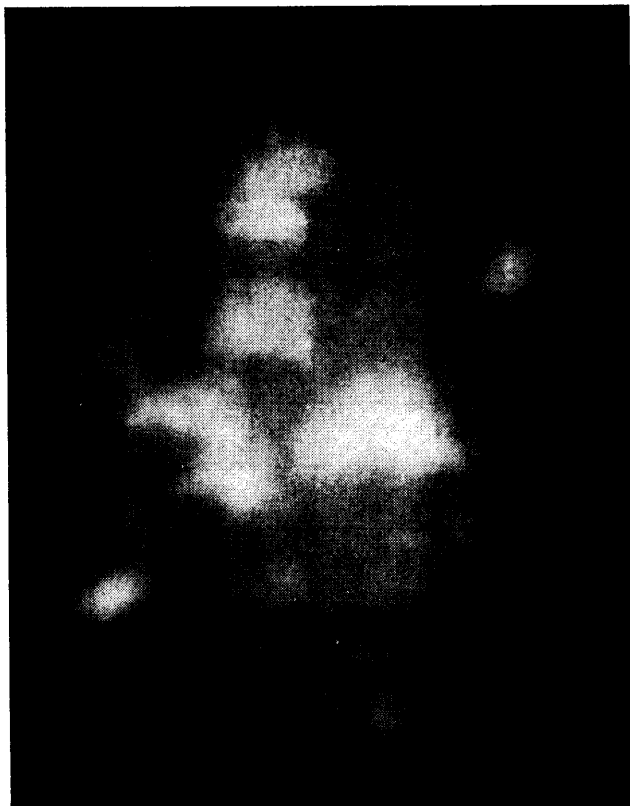
Соотношение (3.2) можно записать в виде

$$N h^2 (Q - Q_*) = K_D \quad (3.3)$$

Здесь  $Q$  — объемный расход воздуха,  $Q_*$  — объемный расход воздуха, соответствующий началу псевдооживления,  $K_D$  — постоянная, имеющая размерность коэффициента диффузии. При  $K_D = 4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{сек}$  полученные результаты описываются зависимостью (3.3) с точностью  $\pm 15\%$ . Если указанное значение окажется универсальной постоянной (на это позволяет надеяться широкий диапазон условий, при которых проводились опыты), то соотношение (3.3) можно будет использовать для определения концент-

рации пузырей. Тогда из (2.4) и (2.7) можно рассчитать размер пузырей, т. е. получить важную информацию, необходимую для расчета реактора. В случаях, когда газораспределительным устройством служит устройство, отличное от пористой плиты, необходимо еще определить значение  $h_0$ .

**4. Испытания модели реактора.** Для анализа химического реактора необходимы два вида информации. Во-первых, должны быть известны параметры, связанные с термодинамикой и кинетикой реакции. Во-вторых, дол-



Фиг. 5

жен быть изучен характер движения реагентов и их взаимодействие с катализатором. В большинстве случаев все эти сведения известны недостаточно. Ниже анализируется вторая группа из указанных вопросов. Несмотря на широкую известность и распространенность многих реакций газа с твердыми частицами, лишь в отдельных случаях достаточно изучена кинетика реакции. На первом этапе исследований была поставлена задача подобрать хорошо изученную и достаточно простую реакцию.

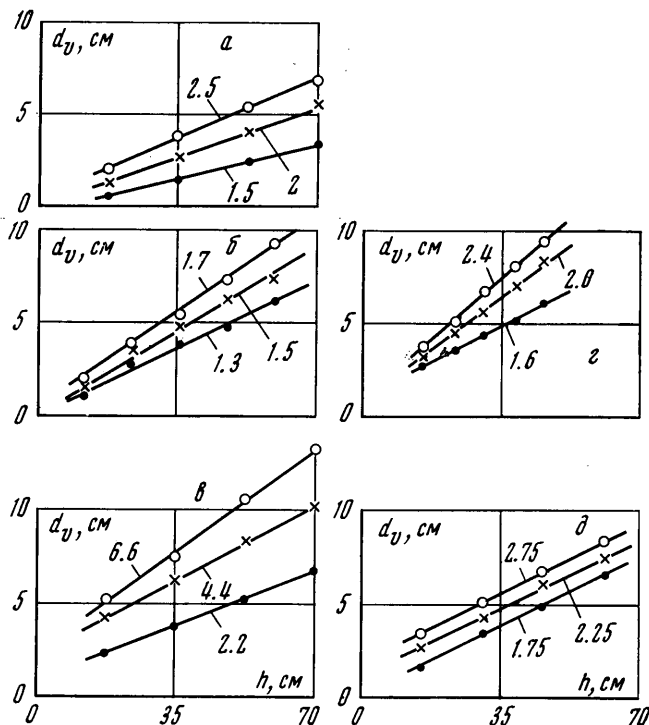
Такой реакцией служит изомеризация *n*-бутила (бутил-1  $\rightarrow$  бутил-2), протекающая в присутствии силиконо-алюминиевого катализатора. Реакция протекает при умеренных температурах ( $\sim 100^\circ \text{C}$ ), не сопровождается изменением объема, имеет низкую теплоту реакции и приблизительно первый порядок. Реагент и продукты реакции легко отождествляются методом газовой хроматографии. Катализатор устойчив и сохраняет свою активность в течение продолжительного времени.

Силиконо-алюминиевый катализатор (диаметр частиц 118  $\mu\text{к}$ ) был заключен в цилиндрический сосуд диаметром 15 см и высотой 1 м. В основа-



нии сосуда помещалась пористая плита. Температура слоя регулировалась при помощи обогревательного устройства. В качестве псевдооживающего газа была взята смесь азота и бутила. На выходе слоя периодически отбирались пробы газа, состав которых анализировался.

Первая серия опытов [7] была проведена при низкой температуре ( $\sim 104^\circ\text{C}$ ), когда скорость конверсии сравнительно мала. В связи с этим разница в составах газа в пузырях в промежутках между частицами была невелика, поэтому результаты расчетов слабо зависели от скорости газооб-



Фиг. 6

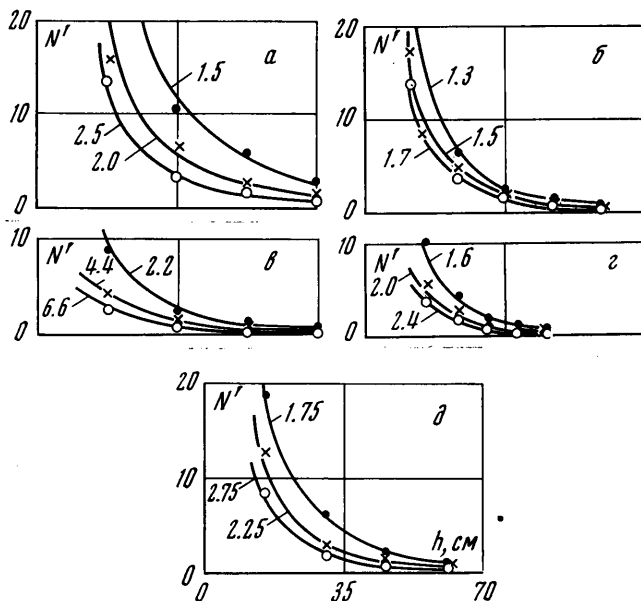
мена. Результаты расчета, полученные на основании физической модели [1, 2], хорошо согласуются с результатами расчета, в котором средние размеры пузырей берутся на основании опытов с просвечиванием слоя рентгеновскими лучами и на основании приведенных выше соотношений.

Следующая серия опытов была проведена при высоких температурах ( $150^\circ\text{C}$ ), когда скорость конверсии по крайней мере на порядок выше, чем в первой серии экспериментов. Эти опыты должны были служить для проверки предложенной модели газообмена. Однако обнаружилось дополнительное осложнение [8]. Дело в том, что частицы катализатора пористые и поглощают реагирующие вещества. Поэтому движение частиц обуславливает новую разновидность смешения газа, что при высоких скоростях реакций также должно быть принято во внимание. Соответствующая модификация модели возможна, но расчет при этом усложняется. Указанное обстоятельство может служить иллюстрацией важности метода испытания модели. В данном случае был обнаружен дополнительный механизм, который мог бы остаться незамеченным.

**5. Расслоение твердой фазы.** В случае, когда частицы твердой фазы во взвешенном слое различны по размерам или плотности, может возникнуть

расслоение твердой фазы, которое должно повлечь изменения в модели ректора. Для анализа этого явления были проведены эксперименты с разными бинарными смесями. Цель этих экспериментов — исследование механизма расслоения и равновесного распределения частиц, достигаемого при заданных условиях.

Для анализа этого механизма были использованы как двумерные слои, так и цилиндрический слой с секционированием по высоте [7]. Опыты проводились с бинарными смесями сферических частиц, различающихся по размерам, по плотности или по плотности и размерам одновременно. Таким образом, скорости начала псевдооживления для компонентов смеси могут различаться, но могут и совпадать. Итак, возможны шесть разных комбинаций компонентов, и каждая из этих комбинаций



Фиг. 7

исследовалась. В опытах компоненты смеси располагались первоначально горизонтальными слоями; после псевдооживления в течение некоторого времени или после внесения возмущения, обусловленного одиночным пузырьком, картина фотографировалась или проводился послойный анализ состава слоев.

Было установлено, что небольшое различие в плотностях немедленно приводит к расслоению, в то время как довольно значительное различие в размерах сказывается слабо. Более легкие или более мелкие частицы всегда переносятся в верхнюю часть слоя в кильватерной зоне пузырька. Более плотные или более крупные частицы переносятся аналогичным образом, но с меньшей скоростью. Плотные и тяжелые частицы проваливаются также вниз вследствие возмущений пористости, вызванных пузырьком. По-видимому, здесь образуется застойная зона, в которой расслоение частиц возникает в результате встряхивания смеси. Очень плотные частицы могут также проваливаться сквозь пузырьки.

Количественные эксперименты проводились в трубе диаметром 15 см со слоем высотой 20 см. В качестве газораспределительного устройства использовалась пористая плита. Смеси разного типа псевдооживались в течение нескольких минут, после чего подача воздуха резко прекращалась и система анализировалась послойно. Примечательно, что верхняя часть псевдооживленного слоя была всегда однородной по составу, последний определялся скоростью воздуха и различием по плотности или размерам. В случае различия по плотности в нижней части всегда образовывался слой, состоящий почти целиком из плотного материала; исключение состав-

ляли лишь случаи очень высоких скоростей воздуха. Этот эффект проявлялся в значительно меньшей степени в случае различия по размерам.

В случае смесей, состоящих из разных по плотности частиц, было установлено, что состав верхней части слоя пропорционален отношению плотностей тяжелой и легкой фракций в степени  $-5/2$ , а в случае различия по размерам — пропорционален отношению размеров крупной и мелкой фракций в степени  $-1/5$ . Изменение состава с увеличением скорости воздуха носило сложный характер, причем критической величиной служила скорость начала псевдооживления более легких или более мелких частиц. При превышении этой критической величины содержание плотных или крупных частиц в верхней части слоя сначала резко возрастает, но скорость этого возрастания падает с увеличением скорости.

Автор признателен Dr. D. J. Everett, Dr. A. J. Agbim, Dr. S. T. Whang, Mr. J. C. Middleton, Mr. T. J. Evans, Mr. J. A. P. Constans, Miss L. Cheung, Dr. A. A. H. Drinkenburg, Dr. A. W. Nienow, Dr. R. Matsuno, Dr. J. G. Yates, участвовавшим в работе.

Поступило 29 XII 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Partidge B. A., Rowe P. N. Chemical reaction in a bubbling gas fluidised bed. *Trans. Inst. Chem. Engng.*, 1966, vol. 44, p. T 335.
2. Partridge B. A., Rowe P. N. Analysis of gas flow in a bubbling fluidised bed when cloud formation occurs. *Trans. Inst. Chem. Engng.*, 1966, vol. 44, p. T 349.
3. Rowe P. N., Evans T. J., Middleton J. C. Transfer of gas between bubbles and dense phase in a two dimensional fluidised bed. *Chem. Engng. Sci.*, 1971.
4. Тоёи R., Матсuno R. The coalescence of bubbles in the gas/solid fluidised bed. *Proc. Internat Sympos. on Fluidisation, Eindhoven. Netherlands Univ. Press., Amsterdam, 1967, p. 271.*
5. Матсuno R., Rowe P. N. The distribution of bubbles in a fluidised bed. *Chem. Engng. Sci.*, 1970, vol. 26, p. 1587.
6. Rowe P. N., Матсuno R. Single bubbles injected into a gas fluidised bed and observed by X rays. *Chem. Eng. Sci.*, 1971, vol. 26, p. 923.
7. Rowe P. N., Partridge B. A., Cheney A. G., Henwood G. A., Lyall E. The mechanism of solids mixing in fluidised beds. *Trans. Inst. Chem. Engng.*, 1965, vol. 43, p. T271.
8. Yates J. G., Rowe P. N., Constans J. A. P. Adsorption effects in fluidised bed reactors. *2nd Internat. Sympos. on Chem. Reaction Eng., Amsterdam, May 1972.*