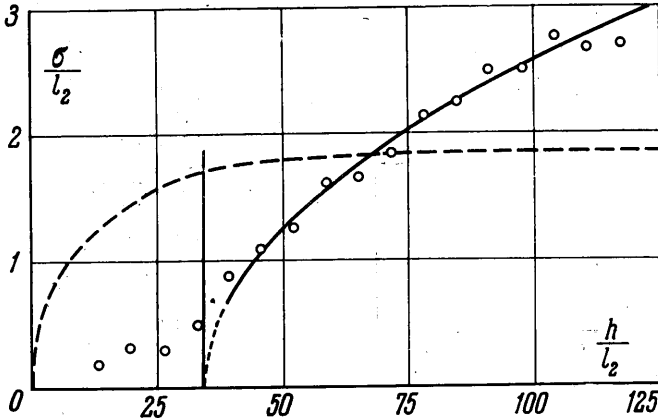


СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ КАПЕЛЬ

У. И. ИВАНОВ

(Рига)

Двухфазные системы находят все большее применение в технике, особенно — в химической технологии. Поэтому изучению движения жидких частиц в жидкости уделяется большое внимание. Основные результаты выполненных исследований обобщены в работах [1, 2]. Исследователями обычно определялась скорость установившегося движения частицы в зависимости от размера или состава фаз. На основе этих измерений рассчитывались коэффициент сопротивления, число Рейнольдса и некоторые другие характеристики движения. Однако только этих данных недостаточно для удовлетворительного предсказания движения двухфазной системы и расчета аппаратуры [3].



Фиг. 1. Зависимость дисперсии рассеяния траекторий падающих в электролите капель от пройденного расстояния. Штриховая линия — местное число Рейнольдса

Существенное влияние на движение жидких частиц (и всей двухфазной системы) оказывает двойной слой, образующийся на межфазной поверхности. Вероятно, невниманием к этому факту объясняется несоответствие теории с экспериментом для дистиллированной воды [2].

Траектория падающей капли только при очень малых числах Рейнольдса представляет вертикальную прямую. При числах Рейнольдса, значительно больших единицы, обычно принимается, что движение происходит по винтовой линии. Однако достоверных наблюдений траектории частицы при больших числах Рейнольдса нет. Взаимодействие частицы с ее турбулентным следом и кормовыми вихрями имеет статистический характер, поэтому ее движение, согласно статистической гидромеханике [4], в общем случае должно описываться случайными функциями. В этом случае изучение траектории отдельной капли не только затруднительно, но и нецелесообразно.

В данной работе определены статистические характеристики траекторий падающих капель в зависимости от параметров процесса. Наиболее удобной статистической характеристикой движения является дисперсия распределения траекторий частиц в определенной горизонтальной плоскости. Дисперсия распределения траекторий частиц характеризует вероятность сближения их в двухфазном потоке, а следовательно, — и интенсивность их взаимодействия (слияние, коагуляция и пр.). При концентрации, соответствующей расстоянию между частицами более 60, взаимодействие маловероятно, и двухфазная система может быть описана в приближении одиночной частицы. При концентрации, соответствующей расстоянию между частицами в пределах дисперсии, должно наблюдаться существенное взаимодействие между частицами. В этом случае описание двухфазной системы на основе закономерностей движения одиночной частицы неприемлемо.

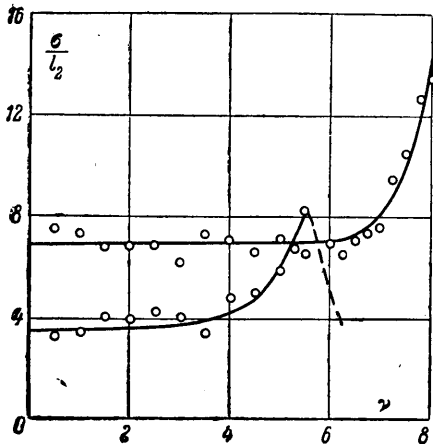
Дисперсия траекторий капель ртути при падении в электролите измерялась на установке, описанной в [5]. В отдельных сериях опытов параметры изменялись в следующих пределах: диаметр капли — от $1.3 \cdot 10^{-3}$ до $3.3 \cdot 10^{-3}$ м; путь, проходимый каплей, — от 0.01 до 0.50 м, проводимость раствора — от 10^{-3} до 30 см/м, вязкость раствора — от 10^{-3} до 1 н сек/м², частота капания — от 0.001 до 10 гц.

На фиг. 1 показана дисперсия распределения траекторий капель в зависимости от пройденного пути. На этой же фигуре для сравнения нанесено расчетное изменение

местного числа Рейнольдса. Можно было ожидать, что эти кривые имеют одинаковый вид. Однако эксперимент показал, что дисперсия распределения траекторий капель зависит не только от местного числа Рейнольдса, но и от предыстории движения, т. е. пройденного каплей расстояния. Полученные данные описываются выражением

$$\sigma/l_2 = (ah/l_2 + b)^c$$

где σ — дисперсия распределения траекторий капель; l_2 — диаметр капли; h — пройденное каплей расстояние; a, b, c — постоянные. Постоянная a определяется характеристиками двухфазной системы (вязкостью, диаметром и пр.), а постоянная b в основном зависит от длины участка разгона (вертикальная линия на фиг. 1 отделяет участок разгона от участка установившегося движения). В приведенном случае $a = 0.102$, $b = -3.50$. Показатель степени для различных серий опытов равен 0.5 в пределах точности эксперимента. Зависимость дисперсии распределения траекторий от пройденного пути (или времени) в степени 0.5 можно считать общей закономерностью. Интересно отметить, что аналогичная зависимость характерна для броуновского движения [6]. Броуновское движение обусловлено статистическим взаимодействием частицы с тепловым движением молекул среды, поэтому полученная зависимость может служить подтверждением статистического характера взаимодействия капли с кормовыми вихрями и турбулентным следом.



Фиг. 2. Зависимость дисперсии рассеяния траекторий капель от частоты капания

ми каплями, при сохранении остальных параметров, можно только путем изменения частоты капания. Найденная зависимость дисперсии распределения траекторий капель в горизонтальной плоскости от частоты капания представлена на фиг. 2. Эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется формулой

При уменьшении расстояния между следующими одна за другой каплями увеличивается взаимодействие между ними. Изменить расстояние между последовательными каплями, при сохранении остальных параметров, можно только путем изменения частоты капания. Найденная зависимость дисперсии распределения траекторий капель в горизонтальной плоскости от частоты капания представлена на фиг. 2. Эта зависимость удовлетворительно аппроксимируется формулой

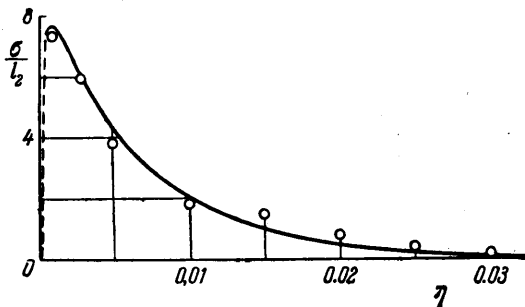
$$\frac{\sigma}{l_2} = \left(\frac{\sigma}{l_2} \right)_0 - \frac{(v - v_0)}{a(v - v_0)^2 + b(v - v_0) + c}$$

Верхняя кривая на фиг. 2 имеет следующие значения постоянных: $(\sigma/l_2)_0 = 6.92$, $v_0 = 9.05$, $a = 2.63$, $b = 6.25$, $c = 3.81$, нижняя кривая на фиг. 2 для капли, диаметр которой в два раза больше, чем в первом случае, имеет постоянные: $(\sigma/l_2)_0 = 3.50$,



Фиг. 3

Фиг. 3. Схема образования групп капель при частоте максимума дисперсии распределения



Фиг. 4

Фиг. 4. Дисперсия распределения траекторий капель в зависимости от вязкости раствора электролита

$v_0 = 7.01$, $a = 1.25$, $b = 3.52$, $c = 2.79$. Значения постоянных зависят от параметров двухфазной системы. Из сравнения кривых видно, что ход кривых одинаков. При боль-

шем диаметре капли частота максимума дисперсии уменьшается. Но одновременно меняются все постоянные в выражении, описывающем данную зависимость. Такое же положение наблюдается и при изменении других параметров.

Следует отметить, что положение и высота максимума слабо зависят от вязкости раствора. При большей вязкости и малых частотах $(\sigma/l_2)_0 \ll 1$. При частоте, соответствующей максимуму дисперсии, визуально можно наблюдать, как капли на участке установившегося движения начинают догонять друг друга и дальше падают группами по 3—4 капли в одной горизонтальной плоскости (фиг. 3).

Таким образом, с уменьшением расстояния между каплями взаимодействие их увеличивается нелинейно. При малых частотах (до 3 сц) взаимодействие между последовательными каплями не наблюдается. Увеличение дисперсии распределения при больших частотах объясняется, по-видимому, взаимодействием последующей капли не только со своим следом, но и со следом предыдущей капли. Поскольку в двухфазной системе расстояние между каплями определяется концентрацией, то зависимость свойств двухфазной системы от концентрации должна иметь аналогичный характер.

С увеличением вязкости раствора изменяется соотношение между сопротивлением трения и сопротивлением формы, меньшая часть энергии расходуется на образование вихрей. В соответствии с этим следует ожидать уменьшения дисперсии

распределения траекторий капель, тем более учитывая возрастание сопротивления и для боковых смещений. Зависимость дисперсии распределения траекторий капель от вязкости раствора представлена на фиг. 4. Результаты можно приближенно представить формулой

$$\frac{\sigma}{l_2} = \left(\frac{\sigma}{l_2} \right)_0 \eta^c e^{dn}$$

Так как опыты проводились при постоянной концентрации раствора электролита, то необходимо дополнительно учитывать изменение проводимости раствора с изменением его вязкости и влияние проводимости раствора на дисперсию распределения траекторий. Кривая на фиг. 4 построена с учетом этих изменений и соответствует выражению

$$\frac{\sigma}{l_2} = 7.0 \eta^{0.15} e^{-150\eta} (1 + 2.68 \text{ th } 0.0294 \eta^{-0.605})$$

При увеличении вязкости раствора дисперсия распределения траекторий капель уменьшается. Если учесть, что число Рейнольдса в переходной области обратно пропорционально вязкости, то можно считать, что в этой области дисперсия приблизительно пропорциональна числу Рейнольдса.

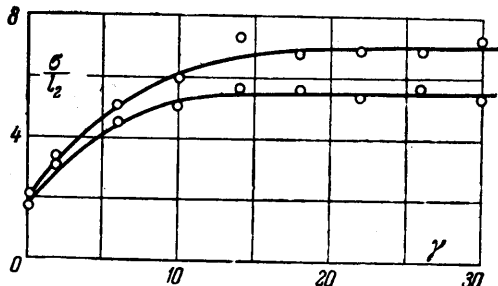
В двухфазной системе можно ожидать, что взаимодействие между частицами соответственно будет пропорционально их числу Рейнольдса.

Существенное влияние на движение и, в частности, на дисперсию распределения траекторий капель оказывает двойной слой, существующий у межфазной поверхности. Движение двойного слоя зависит от проводимости электролита. Зависимость дисперсии распределения траекторий ртутных капель от проводимости раствора показана на фиг. 5. Эту зависимость можно описать выражением

$$\frac{\sigma}{l_2} = \left(\frac{\sigma}{l_2} \right)_0 (1 + a \text{ th } b\gamma)$$

Нижняя кривая имеет следующие значения постоянных: $(\sigma/l_2)_0 = 1.90$, $a = 1.94$, $b = 0.14$. Верхняя кривая получена при тех же условиях, но при наложенном поперечном магнитном поле с индукцией 1 тл и имеет постоянные $(\sigma/l_2)_0 = 1.90$, $a = 2.68$, $b = 0.12$.

При малой проводимости раствора электролита движение поверхности капли заторможено [5,7]. С увеличением проводимости торможение поверхности уменьшается, увеличивается скорость движения капли и соответственно число Рейнольдса. Однако увеличение разброса траекторий в этом случае превосходит увеличение числа Рейнольдса и не может быть объяснено только этим изменением. Увеличение дисперсии распределения траекторий в два-три раза свидетельствует о значительных изменениях режима обтекания и взаимодействия капли с кормовыми



Фиг. 5. Дисперсия распределения траекторий капель в зависимости от проводимости раствора электролита

вихрями и следом при изменении движения двойного слоя в зависимости от проводимости электролита. Влияние магнитного поля, взаимодействующего с токами двойного слоя [7], на дисперсию распределения траекторий подтверждает это предположение.

Распределение траекторий частицы весьма чувствительно к изменению параметров эксперимента. Поэтому дисперсию распределения целесообразно использовать для тонкого изучения механики движения, в частности — режима обтекания и взаимодействия частицы с кормовыми вихрями и турбулентным следом.

На основе изложенного можно оценить влияние некоторых параметров на взаимодействие между частицами в двухфазном потоке и предельную концентрацию частиц, до которой допустимо описание двухфазной системы в приближении одиночной частицы.

В заключение автор выражает глубокую благодарность Ю. А. Михайлову — за организацию и руководство работой, Р. М. Борниковой и Р. З. Лейбович — за помощь в работе.

Поступило 7 I 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Физматгиз, 1960.
2. Hamielec A. E., Johnson A. R. Canad. J. Chem. Eng., 1962, vol. 40, No 41.
3. Сб. Пульсирующие экстракторы (под ред. С. М. Карпачева). Атомиздат, 1964.
4. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Изд-во «Наука», 1965.
5. Иванов У. И., Михайлов Ю. А. Падение ртутных капель в магнитном поле. Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. н., 1965, № 4.
6. Ноздрев В. Ф., Сенкевич А. А. Курс статистической физики. «Высшая школа», 1965.
7. Иванов У. И., Михайлов Ю. А. Движение вблизи поверхности раздела фаз в присутствии электромагнитного поля. Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. н., 1966, № 1.

О ДВИЖЕНИИ ГАЗА ВБЛИЗИ ОБНАЖЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ЕГО ПЕРЕМЕННОЙ ГАЗОПРОНИЦАЕМОСТИ

с. н. осипов, б. п. пясецкий

(Донецк)

Решение задачи движения метана около обнаженной поверхности угольного пласта в работах [1-4] получено при условии постоянной газопроницаемости; в работе [5] рассматривался стационарный процесс.

Проведенные экспериментальные работы показали [6-8], что газопроницаемость угольного пласта K в зависимости от расстояния до обнаженной поверхности x может быть приближенно отражена [9] в виде

$$K = 1/k_0x \quad (1)$$

где k_0 [м⁻³] — эмпирический коэффициент.

Изучение метановыделения из обнаженных поверхностей пластов в подготовительных выработках различных бассейнов [4,10] показало, что следует предполагать наличие влияния времени обнажения пласта на его газопроницаемость. В основе этого процесса лежит изменение проявления сил горного давления в зоне влияния горной выработки с течением времени. Непосредственные замеры подтвердили [8] наличие значительного влияния фактора времени на величину газопроницаемости угольного пласта вблизи обнаженной поверхности.

Учитывая, что в различных горногеологических условиях зависимость (1) может несколько изменяться, и принимая влияние времени на газопроницаемость пласта в виде $\varphi(t)$, значение коэффициента газопроницаемости можно представить как

$$K = x^{-n} \varphi(t) \quad (n > 0) \quad (2)$$

Уравнение движения газа в призабойной части пласта с учетом (2) оказывается подобным известному [11] и с учетом требований автомодельности примет вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \alpha \varphi(t) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{x^n} \frac{\partial U}{\partial x} \right) \quad \left(U = p^2, \quad \alpha_* = \frac{p_0}{\mu [m + abRT(1 + bp_0)^{-2}]} \right) \quad (3)$$

Здесь t [сутки] — промежуток времени с начала обнажения пласта; p [ата] — давление газа в пласте; p_0 [ата] — начальное давление газа в пласте вне зоны влия-