

Коэффициент равномерности γ тем больше, чем больше отношение расхода полимерного раствора q к суммарному расходу жидкости Q в ТПС. Однако, как отмечалось выше, γ никогда при щелевой подаче не превышает значения $\sim 0,55$ и переход от зависимости (4) к постоянному значению происходит для полимерных растворов тем раньше, чем меньше продольный масштаб диффузии L . В данных опытах даже при максимальных значениях не удавалось получить в конечной области диффузии полимерных добавок значений γ , меньших, чем $0,42-0,45$, что всего на 20—30% отличается от асимптотического значения $0,55$. При малых значениях gc_0/μ , когда продольный масштаб диффузии L также мал (см. фиг. 3), с самого начала конечной области наблюдалось $\gamma \approx 0,55$.

Поступила 17 II 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Poreh M., Cermak J. E. Study of diffusion from a line source in a turbulent boundary layer.—«Internat. J. Heat and Mass Transfer», 1964, vol. 7, N 10, p. 1083—1095.
2. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Ч. 1. М., «Наука», 1965.
3. Fabula A. G., Burns T. J. Dilution in a turbulent boundary layer with polymeric friction reductions. Naval Undersea Research and Development Center, Pasadena, Calif., 1970, TP 171.
4. Иоселевич В. А., Пилипенко В. Н. О сопротивлении плоской пластины в потоке полимерного раствора переменной концентрации.—«Изв. АН СССР. МЖГ», 1974, № 1.
5. Вдовин А. В. Диффузия полимеров от линейного источника в турбулентном пограничном слое.— В кн.: Тезисы докладов на XXIV Всесоюзной научно-технической конференции по теории корабля. Л., «Судостроение», 1975.
6. Хабахпашева Е. М. Некоторые данные о структуре течения в вязком подслое.— В кн.: Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск, «Наука», 1974.

УДК 532.529

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ

В. А. Архипов, Г. С. Ратанов, В. Ф. Трофимов

(Томск)

Информация о закономерностях слияния и дробления капель жидкости при столкновениях необходима для решения ряда задач динамики двухфазных течений. Исследованию столкновения капель посвящено значительное количество работ [1—8], однако при расчете течений с учетом коагуляции и дробления частиц до сих пор используются приближенные гипотезы и эмпирические формулы для вероятности слияния капель. Ниже рассматриваются результаты кинематографического исследования процесса столкновения свободно летящих в воздухе капель. В отличие от известных работ [2, 3] исследовались не усредненные эффекты массовых соударений, а особенности поведения отдельных взаимодействующих капель в зависимости от значения критериев, определяющих результат столкновения.

Исследование процесса столкновения проводилось на установке, состоящей из двух генераторов, создающих непрерывные встречные потоки монодисперсных капель, которые условно назовем мишенями (капли большего диаметра) и снарядами. Для получения капель-мишеней диаметром $(0,6-1,2) \cdot 10^{-3}$ м использовался генератор типа «вибрирующий капилляр», в котором вибрация с частотой 20—100 Гц создавалась электродинамическим преобразователем. Капли-снаряды диаметром $(0,3-0,8) \cdot 10^{-3}$ м получали на генераторе типа «вращающийся капилляр». Жидкость из резервуара, установленного на оси вращения, по переходной трубке поступала в капилляр. При вращении капля срезалась металлической нитью диаметром $50 \cdot 10^{-6}$ м, помещенной вблизи среза капилляра перпендикулярно плоскости вращения. Это обеспечивало отрыв капли в определенном месте окружности с частотой 5—200 капель в секунду. Скорость столкновения капель $u = 1-5$ м/с. Регистрация процесса столкновения проводилась с помощью скоростной киносъемки камерой СКС-1М с темпом 1500—3000 кадр/с. Эксперименты проводились с дистиллированной водой (плотность, динамическая вязкость и поверхностное натяжение которой соответственно равны $\rho = 10^3$ кг/м³, $\eta = 10^{-3}$ кг/(м·с), $\sigma = 72,88 \cdot 10^{-3}$ кг/с² при температуре +20°C).

Процесс взаимодействия капель с заданным отношением диаметров (в наших экспериментах $\gamma = D_2/D_1 = 1,9+0,8$) определяется углом столкновения θ (угол между вектором скорости столкновения капель и прямой, соединяющей их центры в момент соприкосновения) и критерием Вебера $W = \rho u^2 D_1 / \sigma$. Для водяных капель силы, обусловленные вязкостью, пренебрежимо малы по сравнению с силами поверхностного натяжения и инерционными силами, поэтому влияние критерия, содержащего η (например, $Lr = \rho \sigma D_2 / \eta^2 \sim 10^5$), несущественно. В условиях проведенных экспериментов величина θ не определялась, и полученные результаты являются усредненными для всех возможных значений угла столкновения $\theta = 0 - \pi/2$. В зависимости от величины критерия Вебера в исследованном диапазоне $W = 0,1-120$ наблюдались качественно различные типы взаимодействий.

1. При $0 < W < 0,5$ наблюдалось слияние капель под действием сил поверхностного натяжения (фиг. 1, а). Взаимодействия с малыми значениями W происходили при столкновениях капель от одного генератора, догоняющих друг друга. Причину слияния капель при малых скоростях столкновения можно объяснить колебаниями поверхности капель и понижением давления в зазоре между ними [7], насыщением атмосферы парами жидкости [1, 6], однако однозначного мнения по этому вопросу нет.

2. При столкновениях с W от 0,7 до 1,5 наблюдался отскок капли-снаряда от капли-мишени (см. фиг. 1, б). Вероятной причиной отскока считают наличие газовой прослойки между каплями [1, 7]. Можно предположить, что импульс силы сталкивающихся капель недостаточен для вытеснения газа и реализации физического контакта между ними. В работе [8] явление отскока объясняется упругими свойствами поверхностного слоя капель; слияние капель возможно лишь при значительной их деформации, когда кинетическая энергия столкновения сравнима со свободной энергией поверхности. Это предположение, однако, противоречит фактам слияния капель при близких к нулю скоростях столкновения (см. фиг. 1, а).

3. При значениях W от 2 до 15 наблюдалось устойчивое слияние капель (см. фиг. 1, в). При этом кинетическая энергия капель достаточна для вытеснения воздушной прослойки, и капли входят в физический контакт. Процесс слияния сопровождается сложным движением образовавшейся капли — развитием в ней различных типов колебаний и вращением.



Фиг. 1

4. Столкновение капель при значениях $W > 15$ приводит к временному слиянию капель с последующим разрушением образовавшейся капли (фиг. 2, а). При этом образуются две капли, размеры которых примерно равны размерам сталкивающихся капель. Одной из возможных причин разрушения первоначально слившейся капли является ее вращение, возникающее при нецентральной соударении. Если момент вращения Ω достигает определенной величины Ω_* , капля может разрушиться под действием центробежных сил. В работе [5] теоретически показано, что капля как фигура, топологически эквивалентная сфере, существует при значениях безразмерного момента вращения $\omega = \Omega / \sqrt{\rho \sigma V^{7/6}} < 2,38$



Фиг. 2

(V — объем слившейся капли). Связь ω и W определяется выражением $\omega = 0,565\sqrt{W}[\gamma^3(1+\gamma)/(1+\gamma^3)^{1/16}] \sin \theta$, откуда для $W_* = 15-30$ получим значение $\omega_* = 5,4-7,6$ (для $\gamma = 1,9$), т. е. почти в два раза больше расчетного значения. При этом для $\sin \theta$ было выбрано математическое ожидание этой величины ($\langle \sin \theta \rangle = 2/3$), рассчитанное в предположении равномерного распределения точек пересечения вектора скорости столкновения с нормальной плоскостью.

5. С дальнейшим увеличением W картина взаимодействия резко меняется. При центральном ударе с $W > 50$ наблюдалось «пробивание» капли-мишени. В момент слияния диаметр мишени увеличивается на 10—15%, затем из тыльной стороны мишени выходит капля, имеющая при-

мерно тот же размер, что и капля-снаряд (см. фиг. 2, б). При этом между каплями образуется перешеек диаметром $\sim 0,1D_1$ и длиной $\sim 4D_1$, который разрушается с образованием четырех и более капель-спутников диаметром до $0,2D_1$.

6. При столкновениях с $W > 100$ наблюдалось раздувание капли-мишени в несколько раз с сохранением сферической формы с возмущениями поверхности волновой структурой. Затем следовало взрывообразное разрушение капли с образованием большого числа осколков, радиально разлетающихся из зоны взаимодействия (см. фиг. 2, в). Вероятно, при достижении определенного значения W взаимодействие капель идет в кавитационном режиме.

Таким образом, определяющим из 6 возможных результатов взаимодействия жидких капель при столкновениях является значение критерия Вебера. В работе экспериментально определены области численных значений этого критерия для каждого типа взаимодействия — слияния при малых скоростях столкновения, отскока капель, устойчивого слияния, разрушения слившейся капли из-за вращательной или колебательной неустойчивости, пробивания капли-мишени, кавитационного разрушения капель.

Авторы выражают благодарность И. М. Васенину за обсуждение результатов работы.

Поступила 10 III 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев А. Д. Слияние капель жидкости при соударениях. — «Труды ЦАО», 1969, вып. 89.
2. Бабуха Г. Л., Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Подвысоцкий А. М. Экспериментальное исследование устойчивости капель при соударениях. — В кн.: Теплофизика и теплотехника. Вып. 21. Киев, «Наукова думка», 1972.
3. Подвысоцкий А. М., Шрайбер А. А. Расчет неравновесного двухфазного течения с коагуляцией и дроблением частиц конденсата при произвольном распределении вторичных капель по массам и скоростям. — «Изв. АН СССР. МЖГ», 1975, № 2.
4. Adam J. R., Lindblad N. R., Hendricks C. D. The collision, coalescence and disruption of water droplets. — «J. Appl. Phys.», 1968, vol. 39, p. 5173—5180.
5. Brazier-Smith P. R., Jennings S. G., Latham J. The interaction of falling water drops: coalescence. — «Proc. Roy. Soc.», A, 1972, vol. 326, p. 393—408.
6. Прохоров П. С., Яшин В. Н. О причинах неслияния водных капель при соударениях. — «Коллоидный журн.», 1948, т. 10, № 2.
7. Jayaratne O. W., Mason B. J. The coalescence and bouncing of water drops at air/water surfaces. — «Disc. Faraday Soc.», 1960, N 30, p. 72—77.
8. Gunn R. Collision characteristics of freely falling water drops. — «Science», 1965, N 150 (3697), p. 695—701.