

## ЛИТЕРАТУРА

1. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М., Мир, 1971.
2. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М., Энергия, 1970.
3. Гельперин Н. П., Айнштейн В. Г., Крупник Л. И., Мамедяев З. Н. Гидродинамическое сопротивление потоков газозвеси.— Изв. высш. учеб. заведений. Энергетика, 1976, № 2.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М., Наука, 1969.
5. Vujewitsch J. A. Bemerkung über die Konstruktion von Modellen für wandnahe Turbulenz.— Z. Angew. Math. Mech., 1969, Bd 49, S. 372.
6. Буевич Ю. А. К модели снижения сопротивления при введении частиц в турбулентный поток вязкой жидкости.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1970, № 2.
7. Буевич Ю. А., Гупало Ю. П. О влиянии взвешенных частиц на вырождение изотропной турбулентности.— ПМТФ, 1965, № 4.
8. Буевич Ю. А., Гупало Ю. П. Искажение энергетического спектра вырождающейся изотропной турбулентности под влиянием взвешенных частиц.— ПМТФ, 1965, № 5.
9. Кейз К. О., Цвайфель П. Линейная теория переноса. М., Мир, 1972.
10. Оцисик М. Н. Сложный теплообмен. М., Мир, 1976.
11. Цветков Ф. Ф. Исследование местной теплоотдачи от стенки трубы к турбулентному потоку газа, несущему взвешенные твердые частицы. Дис. на соиск. учен. степени канд. технических наук. М., МЭИ, 1967.
12. Сукомел А. С., Цветков Ф. Ф., Керимов Р. Р. Теплообмен и гидродинамическое сопротивление при движении газозвеси в трубах. М., Энергия, 1977.

УДК 532.529 : 66.021.3

### ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ НА ПРОЦЕССЫ КОАЛЕСЦЕНЦИИ И МАССООБМЕНА В ЖИДКОСТНЫХ ЭМУЛЬСИЯХ

*Л. П. Пергушев, А. К. Розенцвайг*

*(Бугульма)*

Коалесценция капель дисперсной фазы лежит в основе разделения несмешивающихся жидкостей при осуществлении экстракционных и массообменных процессов в химической, фармацевтической, пищевой и ряде других отраслей промышленности [1]. В последние годы достигнут большой прогресс в разрушении с помощью высокоэффективных деэмульгаторов нефтяных эмульсий на промыслах и нефтеперерабатывающих заводах [2, 3]. Однако взаимодействие капель, оказывающее исключительно большое влияние на массопередачу и химические реакции в дисперсной фазе, изучено недостаточно [4].

С коалесценцией капель под воздействием перемешивания, в частности, при движении эмульсии в турбулентном режиме, связана интенсификация широкого круга технологических процессов и повышения качества завершения массообменных и укрупнительных процессов в трубопроводах и аппаратах. Анализ взаимодействия мелкодисперсных капель при разрушении эмульсий химическими методами с применением деэмульгаторов позволяет также решать задачи двухфазных течений в трубопроводах, связанные с определением истинного содержания фаз и границ существования различных структурных форм потока.

В соответствии с реальными условиями разрушения устойчивых эмульсий изучена коалесценция неоднородной дисперсной фазы, часть капель которой стабилизирована адсорбционными оболочками, разрушающимися при взаимодействии с каплями раствора реагента. Различие

в частоте эффективных столкновений позволяет моделировать массообмен и укрупнение капель, сопровождающееся распределением деэмульгатора в дисперсной фазе устойчивых систем несмешивающихся жидкостей. Результаты численных экспериментов с помощью ЭВМ позволяют делать важные в практическом отношении выводы, рассчитывать достижимую степень завершения реальных массообменных процессов на стадии проектирования, а также могут служить основой для оптимизации и управления процессами, связанными с коалесценцией дисперсной фазы эмульсий.

**1. Описание однородной коалесценции.** Рассмотрим процесс укрупнения в однородных неустойчивых эмульсиях, где все капли дисперсной фазы лишены защитных адсорбционных оболочек. Для конкретности описания коалесценции мелкодисперсных капель в образованной двумя несмешивающимися жидкостями эмульсии условия перемешивания ограничены турбулентным потоком в горизонтальном трубопроводе. Воспользуемся уравнениями материального баланса количества капель и объема дисперсной фазы в дифференциальной форме в соответствии с работами [5, 6]

$$(1.1) \quad \frac{d\delta}{dl} = -\frac{\delta}{3n} \frac{dn}{dl}, \quad \frac{dn}{dl} = -\frac{\theta}{2} \frac{n}{v_0},$$

где  $\delta$  — диаметр;  $n$  — количество капель в единице объема сплошной среды;  $v_0$  — средняя по расходу скорость потока в трубопроводе длиной  $l$ .

Модель коалесценции построена с учетом следующих упрощающих допущений. Турбулентный поток в трубопроводе является локально-изотропным, капли дисперсной фазы не превышают микромасштаба турбулентности  $\lambda_0$  и полностью увлекаются пульсациями скорости сплошной среды. Эмульсия считается монодисперсной и разбавленной. Последнее обстоятельство позволяет не учитывать влияния концентрации капель на вязкость и характеристики турбулентности двухфазного потока.

Частота слияний капель под воздействием осредненного градиента пульсационных скоростей локально-изотропного турбулентного потока имеет вид [7, 8]

$$(1.2) \quad \theta = K_{\Gamma} \frac{4}{3} n R^3 \Gamma,$$

где  $R$  — эффективный радиус коалесценции капель, равный в монодисперсных эмульсиях их диаметру  $\delta$ ;  $K_{\Gamma}$  — константа эффективности столкновений, являющаяся отношением числа слияний капель к общему числу их столкновений. В случае локально-изотропной турбулентности осредненный градиент  $\Gamma = (2\varepsilon/15\nu)^{0.5}$  [9]. Энергия диссипации на единицу массы турбулентного потока за единицу времени  $\varepsilon = \lambda v_0^3/2D$  [10]. Коэффициент гидравлического сопротивления выражается через критерий Рейнольдса  $Re = v_0 D/\nu$  с помощью формулы Блазиуса  $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$  ( $D$  — диаметр трубопровода,  $\nu$  — кинематическая вязкость сплошной среды).

С учетом выражения для концентрации дисперсной фазы  $W = n\delta^3/6$  и граничного условия  $\delta|_{l=0} = \delta_0$  решение системы уравнений (1.1) относительно диаметра капель после подстановки выражения частоты слияний (1.2) записывается в виде

$$(1.3) \quad \frac{\delta}{\delta_0} = \exp\left(\frac{K_{\Gamma} W Re^{\frac{3}{8}}}{16,22D} l\right).$$

**2. Модель неоднородной коалесценции.** Коалесценция однородной дисперсной фазы обобщается на эмульсию, капли в которой разделены

на два класса главным образом из-за различия в константах эффективности столкновений, следующим образом. Обозначим количество этих капель через  $n_1$  и  $n_2$ , а диаметры  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Запишем константы эффективности столкновений одинаковых капель через  $K_{11}$  и  $K_{22}$ , различных через  $K_{12}$ . Выражение частоты слияний (1.2) принимает для  $i$ -х капель с эффективным радиусом коалесценции  $((\delta_i + \delta_j)/2)^3$  следующий вид:

$$\theta_{ij} = K_{ij} \frac{4}{3} n_i \left( \frac{\delta_i + \delta_j}{2} \right)^3 \Gamma, \quad i, j = 1, 2.$$

Уравнением для расчета диаметров коалесцирующих капель является условие сохранения объема неоднородной дисперсной фазы, которое записывается в форме

$$(2.1) \quad n_1 \pi \delta_1^3 / 6 + n_2 \pi \delta_2^3 / 6 = W.$$

С учетом того, что  $W = \text{const}$ , дифференцирование левой части выражения (2.1) дает для диаметров  $\delta_1$  и  $\delta_2$  зависимость, подобную первому уравнению системы (1.1).

Количество капель каждого класса в общем случае коалесценции их с частотой слияний  $\theta_{ij}$  описывается дифференциальными уравнениями

$$\frac{dn_1}{dl} = -\frac{\theta_{11} n_1}{2 v_0} - \theta_{12} \frac{n_2}{v_0}, \quad \frac{dn_2}{dl} = -\theta_{21} \frac{n_1}{v_0} - \frac{\theta_{22} n_2}{2 v_0},$$

с граничными условиями

$$n_i |_{l=0} = n_i^0, \quad i = 1, 2.$$

Примем, что капли диаметром  $\delta_1$  имеют адсорбционные оболочки, препятствующие их слиянию между собой, т. е.  $K_{11} = 0$ . Капли диаметром  $\delta_2$  содержат высокоэффективный деэмульгатор, который способствует слиянию этих капель с каплями размером  $\delta_1$  и разрушению защитных оболочек на поверхности вновь образованных капель, переводя их в класс капель  $n_2$ . Поэтому диаметр стабилизированных капель  $\delta_1 = \text{const}$ , а число их  $n_1$  уменьшается лишь за счет слияния с каплями  $n_2$ . Число капель  $n_2$  может меняться только за счет слияний между собой, а диаметр их определяется соотношением (2.1) и увеличивается от начального размера  $\delta_2^0$  до величины  $\delta \leq \lambda_0 = D/\text{Re}^{0.75}$ , являющейся верхней границей области применения градиентного механизма коалесценции [8].

На основании принятых допущений система уравнений, описывающая коалесценцию в неоднородной дисперсной фазе, приводится к виду

$$(2.2) \quad \frac{dn_1}{dl} = -\frac{4}{3} K_{12} n_1 n_2 \left( \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \right)^3 \frac{\Gamma}{v_0},$$

$$\frac{dn_2}{dl} = -\frac{2}{3} K_{22} n_2^2 \delta_2^3 \frac{\Gamma}{v_0}, \quad n_1 \frac{\pi \delta_1^3}{6} + n_2 \frac{\pi \delta_2^3}{6} = W.$$

**3. Обсуждение результатов численного анализа.** Введем параметры  $\alpha$  и  $\alpha_0$ , характеризующие относительную долю общей концентрации дисперсной фазы  $W$ , представленную каплями без стабилизирующих оболочек:

$$\alpha = \frac{n_2 \pi \delta_2^3}{6W}, \quad \alpha_0 = \frac{n_2^0 \pi (\delta_2^0)^3}{6W}.$$

Преобразуем систему (2.2) к безразмерному виду

$$(3.1) \quad \frac{dN_1}{dl} = -\frac{K_{12} \alpha_0 W \Gamma}{\pi \delta_1^3 v_0} (1 + \delta_*)^3 N_1 N_2,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{4K_{22}\alpha_0 W \Gamma}{\pi \beta^3 v_0} \delta_*^3 N_2^2, \quad N_1(1 - \alpha_0) + \frac{\alpha_0}{\beta} \delta_*^3 N_2 = 1$$

с граничными условиями

$$(3.2) \quad N_1|_{t=0} = 1, \quad N_2|_{t=0} = 0, \quad \delta_*|_{t=0} = \beta,$$

где  $N_1 = \frac{n_1}{n_1^0}$ ;  $N_2 = \frac{n_2}{n_2^0}$ ;  $\delta_* = \frac{\delta_2}{\delta_1}$ ;  $\beta = \frac{\delta_2^0}{\delta_1^0}$ .

При  $\alpha_0 = 1$   $N_1 = 0$ , а система (3.1) сводится к исходным уравнениям для однородной дисперсной фазы (1.1). Решение системы безразмерных уравнений (3.1) с граничными условиями (3.2) проводилось на ЭВМ с помощью метода Рунге — Кутты четвертого порядка точности [11, 12]. Отсутствие особенностей в поведении системы позволило использовать конечно-разностную схему с постоянным шагом интегрирования.

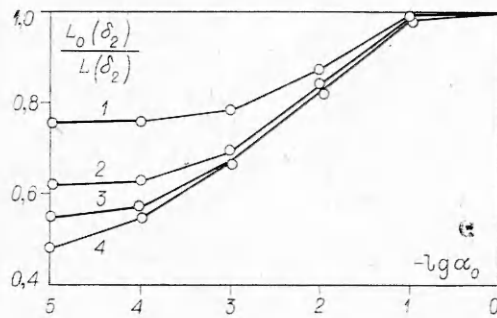
Численными расчетами изучалась коалесценция капель раствора высокоэффективного деэмульгатора в условиях, когда часть дисперсной фазы стабилизирована адсорбционными оболочками. Турбулентность потока характеризовалась  $Re = 20\,000$ , диаметр трубопровода принят равным 0,2 м. Исследовалась монодисперсная разбавленная эмульсия с относительной объемной концентрацией капель  $W = 0,01$ .

Известно, что с увеличением концентрации капель гашение турбулентных пульсаций [13] ведет, вообще говоря, к снижению частоты их столкновений. Однако многочисленными экспериментальными исследованиями показано [14], что роль повышения концентрации капель превышает их отрицательное воздействие на частоту столкновений, а эффективность процесса коалесценции возрастает. Кроме того, допущение монодисперсности капель занижает общее число их столкновений относительно эквивалентной по количеству капель полидисперсной системы [15]. Результаты расчетов описывают наиболее неблагоприятные условия разрушения эмульсии.

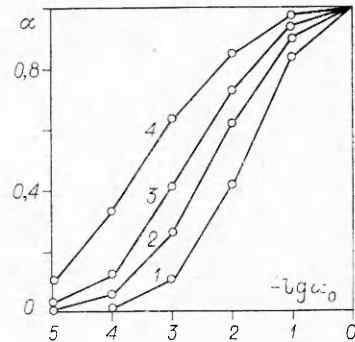
На фиг. 1, 2 представлены результаты численного моделирования коалесценции в неоднородной фазе эмульсии с параметрами  $K_{12} = K_{22} = 0,5$ ,  $\beta = 1$ , кривые 1 —  $\delta_2^0 = 25$ ; 2 — 15; 3 — 10 и 4 — 5 мкм. Величина  $L_0$  обозначает длину трубопровода, необходимую для укрупнения капель до величины  $\lambda_0$  в однородной эмульсии при  $\alpha_0 = 1$  (по формуле (1.3)), а  $L$  отражает влияние устойчивой части дисперсной фазы на укрупнение лишенных адсорбционных оболочек капель. Наряду с укрупнением капель без адсорбционных оболочек происходит снижение числа капель размером  $\delta_1 = \text{const}$ , вовлекаемых ими в коалесценцию. Анализ кривых 1—4 показывает, что с уменьшением  $\alpha_0$  скорость коалесценции снижается не более чем в два раза. Это обстоятельство противоречит экспериментальным данным по разрушению устойчивых эмульсий [1, 3]. Поэтому моделирование коалесценции позволяет сделать вывод, что в реальных условиях  $K_{12}$  нельзя считать равной  $K_{22}$ .

Для иллюстрации характера коалесценции при различии в константах эффективности столкновений на фиг. 3 приведены кривые, характеризующие влияние величины  $\alpha_0$  на укрупнение капель с параметрами  $\delta_2^0 = \delta_1 = 10$  мкм,  $K_{22} = 0,5$ , кривая 1 —  $K_{12}/K_{22} = 1$ ; 2 — 0,75; 3 — 0,5; 4 — 0,25; 5 — 0,1; 6 — 0,01. Так, для кривых 5, 6 в области малых значений  $\alpha_0$  процесс укрупнения практически прекращается, что свидетельствует о хорошем соответствии модели коалесценции неоднородной дисперсной фазы реальным процессам разрушения устойчивых эмульсий.

Очевидно, что соответствие между моделью и реальными эмульсионными системами достигается подбором соответствующих констант эффек-



Ф и г. 1



Ф и г. 2

тивности столкновений, отражающих влияние на коалесценцию состава и физико-химических свойств фаз эмульсии, стабилизирующих компонентов и деэмульгаторов различного типа. Аналитически учесть влияние этих факторов без привлечения данных эксперимента с реальными жидкостными системами практически невозможно [16]. Только сопоставление расчетных данных и результатов изучения укрупнения конкретной эмульсионной системы на модельных установках позволяет учесть ее индивидуальные особенности [17].

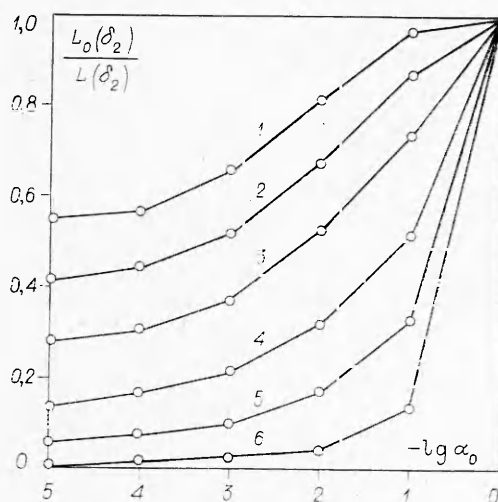
Исследовалось также влияние на скорость массообмена и коалесценции соотношения начальных размеров капель двух классов  $\delta_1$  и  $\delta_2^0$ . На фиг. 4 показаны результаты численного расчета коалесцирующей части дисперсной фазы  $\alpha$  с параметрами  $\delta_1 = 10$  мкм,  $K_{12} = K_{22} = 0,5$ , кривая 1 —  $\delta_2^0/\delta_1 = 0,5$ ; 2 — 0,75; 3 — 1; 4 — 1,5 и 5 — 2,5. Оказалось, что если капли с раствором деэмульгатора меньше стабилизированных капель, то при прочих равных условиях процесс коалесценции способствует более эффективному массообмену в дисперсной фазе. Поэтому размеры капель раствора деэмульгатора наряду с их начальным количеством могут служить эффективным средством воздействия на процесс разрушения устойчивых эмульсий.

Следует отметить, что наряду с укрупнением части капель в потоке остаются мелкодисперсные капли размером  $\delta_1$  (на фиг. 2—4 их количество характеризуется величиной  $1-\alpha$ ). Качественное завершение массообменных и укрупнительных процессов в дисперсной фазе эмульсий несмешивающихся жидкостей имеет место при  $\alpha \approx 1$ . Поэтому данные фиг. 1—4 можно рассматривать так же, как моделирование процесса укрупнения однородной дисперсной фазы в условиях, отличных от принятых при расчетах (идеальной модели (1.1)—(1.3)). Тогда проявление неоднородности дисперсной фазы по составу, количеству и размерам капель интерпретируется конкретным выражением отклонения от расчетных некоторых показателей реального процесса. Исходя из этого, модель неоднородной коалесценции (3.1) можно использовать для оптимизации и управления коалесценцией в однородной дисперсной фазе жидкостных эмульсий.

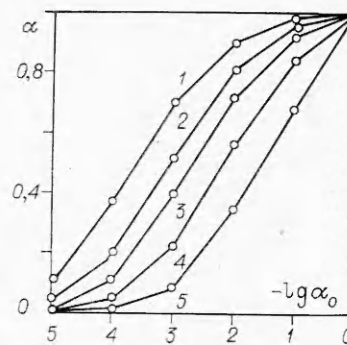
Для учета остаточного содержания не принявших участия в коалесценции капель  $n_1$  на эффективность укрупнения дисперсной фазы в целом введен среднееобъемный диаметр капель

$$\langle \delta \rangle = \delta_1 / \left( 1 - \alpha + \frac{\alpha}{\beta^3} \right)^{1/3}.$$

При этом коалесценция в неоднородной дисперсной фазе ограничена размером  $\delta_2 = \lambda_0$  и длиной трубопровода  $L(\lambda_0)$ , которая отражает влияние



Ф и г. 3



Ф и г. 4

$\langle \delta \rangle$ , характеризуемой в соответствии с (1.3) длиной трубопровода  $L_0(\langle \delta \rangle)$ . На фиг. 5 показан характер ослабления коалесценции в стабилизированной эмульсии с параметрами  $\delta_1 = 10$  мкм,  $K_{12} = K_{22} = 0,5$ , кривая 1 —  $\delta_2^0/\delta_1 = 0,5$ ; 2 — 0,75; 3 — 1,0; 4 — 1,5 и 5 — 2,5. Характер этих кривых свидетельствует о существенном влиянии капель с адсорбционными оболочками на укрупнение дисперсной фазы даже при наиболее благоприятном соотношении констант эффективности столкновений.

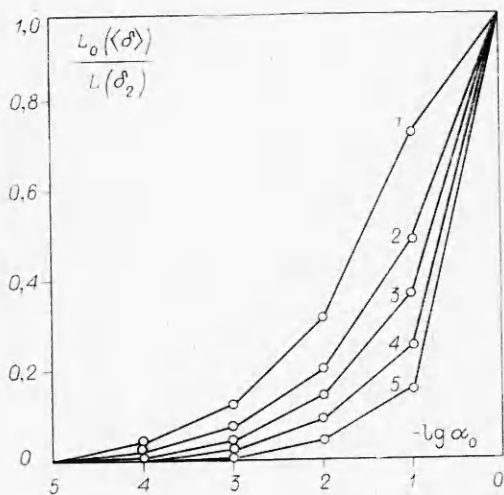
**4. Определение констант  $K_{12}$  и  $K_{22}$ .** Для того чтобы можно было оценить правомочность предложенной модели коалесценции (3.1) по экспериментальным данным, необходимо знать константы эффективности столкновений диспергированных капель жидкости между собой  $K_{22}$ , а также с каплями, стабилизированными бронирующими оболочками  $K_{12}$ .

**Оценка  $K_{22}$ .** Изучению скорости взаимодействия в однородной дисперсной фазе перемешиваемых бинарных жидкостных систем, не содержащих стабилизаторов эмульсий, посвящено большое количество экспериментальных работ [4]. Однако в них определение частоты слияний связано с такими косвенными методами, как исследование скорости распределения красителя, изменения концентрации индикатора, протекания химической реакции. Лишь в работе [18] приведены результаты прямого замера с помощью оптического датчика из стекловолокна и скоростной киносъемки числа столкновений капель, заканчивающихся их слиянием. Причем визуальными наблюдениями установлено, что размер капель в условиях эксперимента намного меньше масштаба турбулентных вихрей. Последнее обстоятельство дает возможность сравнить теоретическую частоту столкновений, рассчитанную по формуле (1.2), с приведенными в табл. 3 работы [18] результатами замеров.

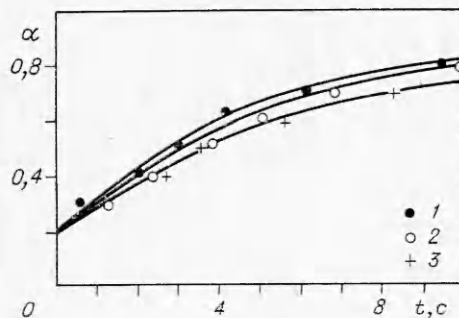
Расчетное значение частоты столкновений в смесительном аппарате с учетом осредненной величины энергии диссипации при  $W = 0,5\%$  составило  $1,9 \text{ с}^{-1}$ , тогда как в достаточно удаленных от турбинки двух точках аппарата ему соответствовали значения  $1,3$  и  $3,1 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, механизм однородной коалесценции, являющийся наиболее простой формой модели (3.1) при  $n_1 = n_1^0 = 0$ , достаточно хорошо подтверждается

на эффективность укрупнения капель с диаметром  $\delta_1 = \text{const}$  по отношению к однородной коалесценции эквивалентного количества капель осредненного размера





Ф и г. 5



Ф и г. 6

экспериментальными данными. Это позволяет в соответствии с известной процедурой оценивания параметров дифференциальных уравнений [19] определить константу эффективности столкновений лишенных адсорбционных оболочек капель  $K_{22}$  из данных табл. 3 работы [18]. Для обеспечения надежности практических расчетов принимаем константу равной ее минимальному экспериментальному значению,  $K_{22} = 0,02$ .

**Оценка  $K_{12}$ .** Очевидно, что со снижением прочности межфазных пленок величина константы  $K_{12}$  приближается к верхней границе области возможных значений, соответствующей величине  $K_{22}$ . С другой стороны, упрочнение адсорбционных пленок в связи с реологическими и физико-химическими особенностями дисперсных систем [1—3] в предельном случае позволяет рассматривать капли подобными твердым частицам. Поэтому нижняя граница возможных значений константы  $K_{12}$  соответствует слиянию капель жидкости с твердыми частицами.

В работе [20] приведены результаты экспериментального исследования коалесценции в трехфазной эмульсионной системе, дисперсная фаза которой представлена каплями чистой жидкости и каплями, содержащими различное количество твердых кристаллов. В зависимости от содержания в каплях твердых частиц эффективность столкновений их с каплями чистой жидкости, а следовательно, и константа  $K_{12}$  принимают различные значения. Сравнение данных эксперимента и результатов расчета наряду с проверкой модели неоднородной коалесценции позволяет одновременно оценить значения  $K_{12}$  в рассматриваемых условиях. На фиг. 6 точками представлены результаты экспериментального изучения коалесценции [20] с помощью окрашивания при реакции компонентов, содержащихся в каплях различного сорта, а кривыми — численных расчетов (1 соответствует  $K_{12} = 0,0065$ ; 2 — 0,006; 3 — 0,005). Кривые 1—3 построены для объемной доли твердых частиц в 0,52; 0,65 и 0,71, значение параметра  $\alpha_0$  принято равным 0,2,  $\beta = 0,5$ ,  $K_{22} = 0,02$ . Совпадение оказалось весьма хорошим, значения  $K_{12}$  согласуются с отношением  $K_{22}/K_{12} \approx 3$ , полученным экспериментальным путем.

Поступила 4 IX 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Эмульсии. Под ред. Ф. Шермана. Л., Химия, 1972.
2. Левченко Д. Н., Бергштейн Н. В., Худякова А. Д., Николаева Н. М. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения. М., Химия, 1967.
3. Тронов В. П. Разрушение эмульсий при добыче нефти. М., Недра, 1974.

4. Последние достижения в области жидкостной экстракции. Под ред. К. Хансона. М., Химия, 1974.
5. Тронов В. П., Розенцвайг А. К. Коалесценция дисперсной фазы жидкостных эмульсий при движении в турбулентном режиме.— ЖПХ, 1976, XLIX, № 1.
6. Jeffreys G. V., Davies G. A., Pitt K. The analysis of coalescence in a continuous mixer settler system by a differential model.— A. I. Ch. E. Journal, 1970, vol. 16, N 5.
7. Argaman Y., Kaufman W. J. Turbulence and flocculation.— Proc. of ASCE. J. Sanit. Engng Div., 1970, vol. 96, N SA2.
8. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959.
9. Конт-Белло Ж. Турбулентное течение в канале с параллельными стенками. М., Мир, 1968.
10. Beal S. K. Turbulent agglomeration of suspensions.— Aerosol Science, 1972, vol. 3, N 2.
11. Громова Л. Г., Джабар-Заде Р. М. Стандартная программа для интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге — Кутты.— В сб.: Вычислительные методы и программирование. М., изд. МГУ, 1962.
12. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНЕ. М., Мир, 1977.
13. Медведев В. Ф., Медведева Л. П. Турбулентное течение разбавленных эмульсий.— ПМТФ, 1975, № 3.
14. Mlinek Y., Resnik W. Drop size in an agitated liquid — liquid systems.— A. I. Ch. E. Journal, 1972, vol. 18, N 1.
15. Gillespie T. The effect of size distribution on the rate constants for collisions in disperse systems.— J. Colloid Sci., 1963, vol. 18, N 6.
16. Тронов В. П., Розенцвайг А. К. К определению частоты слияний капель в дисперсных системах жидкость — жидкость.— ЖПХ, 1975, т. XLVIII, № 5.
17. Розенцвайг А. К., Тронов В. П., Позднышев Г. Н., Мансуров Р. И., Мамлеев Р. А. Моделирование условий образования и разрушения капель дисперсной фазы в турбулентном потоке жидкостных эмульсий.— ЖПХ, 1977, т. L, № 12.
18. Park J. Y., Blair L. M. The effect of coalescence on drop size distribution in an agitated liquid — liquid dispersion.— Chem. Engng Sci., 1975, vol. 30, N 9.
19. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М., Мир, 1973.
20. Sideman S., Shiloh K., Resnik W. Hydrodynamic characteristics of disperse phase crystallisers. II. Coalescence in three phase liquid — liquid — solid systems.— Industrial and Engineering Chemistry. Fundamentals, 1972, vol. 11, N 4.

УДК 532.526

## К ИССЛЕДОВАНИЮ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ СТРУИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ, НЕ СМЕШИВАЮЩЕЙСЯ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

В. И. Елисеев

(Днепропетровск)

При распространении струи вязкой жидкости, не смешивающейся со средой, имеющей температуру ниже температуры замерзания истекающей жидкости, с некоторой точки поверхности струи происходит затвердевание струи. Если считать процесс равновесным, то замораживание жидкости происходит в точке, где жидкость на поверхности струи достигает температуры замерзания  $T_3$ . При стационарном процессе область затвердевания распространяется вниз по течению, постепенно расширяясь и захватывая все новые массы жидкости в струе. Подобные процессы происходят при формовании, например, синтетических нитей и пленок из полимерных расплавов [1].

Рассмотрим задачу о затвердевании струи для наиболее простой модели жидкости — ньютоновской. Часто модель ньютоновской жидкости используется для выявления общих закономерностей некоторого сложного процесса. Кроме того, модель ньютоновской жидкости может служить хорошим приближением для некоторых более сложных жидкостей.