

УДК 621.01.216

Павленко А.М.<sup>1</sup>, Климов Р.А.<sup>1</sup>, Басок Б.И.<sup>2</sup><sup>1</sup>Днепродзержинский государственный технический университет<sup>2</sup>Институт технической теплофизики НАН УкраиныСИЛОВОЕ ДВИЖЕНИЕ КАПЕЛЬ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ  
ЭМУЛЬСИЙ ПРИ ЕЕ ВСКИПАНИИ

Розглянуті процеси силової взаємодії між закипаючими краплями емульсії і їх переміщення, що викликане фазовим переходом. Представлена модель, яка дозволяє визначити динаміку переміщення краплі при дії на неї сил, направлених з боку сусідніх крапель.

Рассмотрены процессы силового взаимодействия между закипающими каплями эмульсии и их перемещение, которое вызвано фазовым переходом. Представлена модель, позволяющая определить динамику перемещения частицы в плоскости при действии на нее сил, направленных со стороны соседних частиц.

The processes of power cooperation are considered between the beginnings to the boil drips of emulsion and caused a phase change their moving. A design, allowing to define the dynamics of moving of particle inplane at operating on it of forces, directed from the side of nearby particles, is presented.

$F$  – сила;  
 $g$  – ускорение;  
 $R$  – радиус;  
 $t$  – температура;  
 $w$  – скорость движения;  
 $x, y$  – координата;  
 $\beta$  – угол;  
 $\mu$  – вязкость;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\tau$  – время.

**Нижние индексы:**

1, 2 – противоположные стороны частицы;  
 $k$  – капли;  
 $k_x, k_y$  – капли по осям  $x$  и  $y$ ;  
 $n$  – нормальная составляющая;  
 $m$  – номер капли;  
 $pr$  – перемещения;  
 $pr_x, pr_y$  – перемещения по осям  $x$  и  $y$ ;  
 $s$  – сопротивления;  
 $m$  – масло;  
 $p$  – пар.

Процессам перемещения капель (газовых пузырьков) дисперсной фазы эмульсии посвящено множество как теоретических, так и исследовательских работ [1, 2]. Во всех работах рассматриваются движущиеся потоки, пульсирующие монодисперсные смеси, которые вытекают через трубы, насадки или сопла. При этом движение частиц принимается ускоренным или замедленным. В данной работе рассмотрим перемещение частиц дисперсной фазы при вскипании эмульсии, которая в начальный момент находится в квазистационарном состоянии.

Как известно, частицы дисперсной фазы могут находиться либо во взвешенном состоянии, которое обеспечивается силами гидродинамического сопротивления (например, при действии силы тяжести), либо могут двигаться с постоянной скоростью, тогда на них действу-

ют силы, вызванные разностью плотностей фаз, разностью скоростей фаз, а также градиентом давления. Когда движение приобретает пульсационный характер, появляются силы Бассэ, связанные с непрерывной перестройкой поля скоростей несущей фазы в окрестности частиц [1], а также силы инерции присоединенных масс, которые вызваны действием увлекаемой частицами части несущей фазы. В литературе приводятся исследования и методики, учитывающие движение частицы в одном направлении на всем промежутке времени под действием силы тяжести, либо при движении вдоль канала. При вскипании эмульсии возможно также перемещение капель дисперсной фазы относительно друг друга и при этом одни капли могут находиться в неподвижном состоянии, а другие будут двигаться с определенной скоростью.

**Постановка задачи**

Рассмотрим элементарный объем реальной эмульсии типа вода-масло, представленный на рис. 1 [3]. Как указано в [1], капли дисперсной фазы могут находиться в равновесии, перемещаться либо деформироваться. Процессы деформации капель остаются не до конца изученными и в большинстве случаев при их рассмотрении форму капли принимают в виде эллипсоида вращения с допущением, что капля движется под действием однонаправленной силы. При вскипании же эмульсии некоторая капля будет находиться под действием сил, направленных со стороны соседних капель, которые могут ее как перемещать, так и деформировать. Учитывая данный факт, форма капли остается неопределенной и ее нельзя считать подобной эллипсоиду вращения. Перемещение же капли осуществляется за счет переменных сил, действующих на нее с разных сторон. Поэтому рассматриваемая капля эмульсии может перемещаться в пространстве в любом направлении и при этом траектория движения может меняться в каждый момент времени. Сама закипающая капля создает силу сопротивления перемещению – силу, действующую на поверхность самой капли со стороны пара. Будем считать, что форма частицы остается недеформируемой, т.е. силы, действующие со стороны соседних капель, могут вызвать только перемещение.

Понятно, что перемещение капли будет осуществляться в сторону наименьшего сопротив-

ления под действием наибольшей суммарной силы. Силу, действующую на объем капли с учетом уравнения Релея-Плессета [4] можно записать

$$F_m = 4\pi\rho_m R_m^2 (R_m g + 1,5|w| \cdot w), \quad (1)$$

где  $g = g_n(x_0, y_0)$ ,  $w = w_n(x_0, y_0)$  – действующие на объем нормальные составляющие ускорения и скорости, соответственно;  $R_m$  – радиус границы раздела масло-пар для частицы с номером  $m = 1, 2...6$ .

Тогда силы, действующие на разные стороны частицы равны

$$F_{1_m} = 4\pi\rho_m R_m^2 (R_m g_{1_m} + 1,5|w_{1_m}| \cdot w_{1_m}), \quad 0^\circ \leq \beta < 180^\circ;$$

$$F_{2_m} = 4\pi\rho_m R_m^2 (R_m g_{2_m} + 1,5|w_{2_m}| \cdot w_{2_m}),$$

$$180^\circ \leq \beta < 360^\circ. \quad (2)$$

Учитывая тот факт, что силы, действующие на противоположные стороны частицы, могут быть как однонаправленными (действовать к центру частицы, либо от центра), так и разнонаправленными (одна сила направлена к центру, другая – от центра), результирующую силу, действующую на частицу можно определить из уравнения

$$F_{1,2_m} = \begin{cases} |F_{1_m} - F_{2_m}|, & k_1 > 0; \\ \max(|F_{i_m}|), & k_1 < 0, \quad i = 1, 2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $k_1 = F_{1_m} / F_{2_m}$  – параметр, определяющий направление действия двух сил.

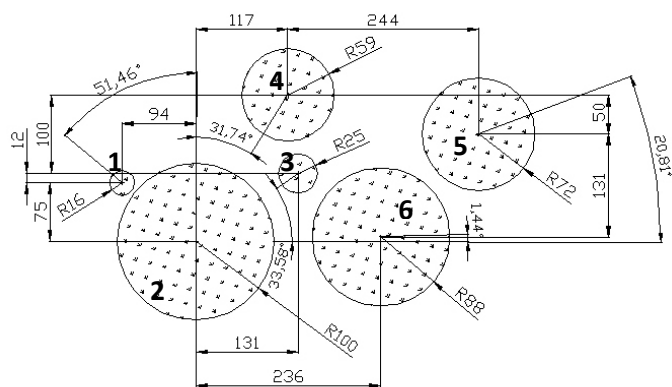
С учетом написанного выше, максимум действующей силы с минимумом противодействия, который может привести к перемещению капли, будет равен

$$F_{\max} = \max(F_{1,2_m}), \quad 0^\circ \leq \beta < 360^\circ. \quad (4)$$

Данная сила действует под определенным углом  $\beta$ , а этот угол в свою очередь определяет возможное направление движения капли.

Сила, которая действует со стороны самой частицы (со стороны расширяющегося, либо сжимающегося объема паровой прослойки) для определенного значения  $m$  равна

$$F_m = 4\pi\rho_m R_m^2 (R_m g_m + 1,5|w_m| \cdot w_m). \quad (5)$$



**Рис. 1. К расчетной модели перемещения капель 1-6 дисперсной фазы эмульсии.**

Определенному значению силы  $F_{max}$  соответствуют значения  $F_{1m}$  и  $F_{2m}$ . Тогда значение силы, вызывающей перемещение частицы с учетом силы противодействия самой капли  $F_m$ , будет определяться из выражения

$$F_{pr} = F_{pr2} - F_{pr1}, \quad (6)$$

где силы  $F_{pr1}$  и  $F_{pr2}$  определяются как равнодействующие между силами  $F_{1m}$  и  $F_{2m}$  и силой противодействия самой частицы  $F_m$ .

Уравнение баланса сил имеет вид

$$F_{pr} - F_s - F_{pm} = F, \quad (7)$$

где  $F_s$  – сила сопротивления;  $F_{pm}$  – сила, вызванная эффектом присоединенной массы;  $F$  – результирующая сила.

Сила сопротивления равна

$$F_s = S_{mid} \xi \rho_M \frac{|w_k|}{2} w_k, \quad (8)$$

где  $S_{mid} = \pi R_m^2$  – площадь миделевого сечения, определяемая выражением;  $R_m$  – радиус закипающей частицы;  $\xi$  – коэффициент сопротивления. Из [2] коэффициент  $\xi$  равен

$$\xi = \left( \frac{16}{Re} + \frac{2,2}{Re^{0,5}} + 0,32 \right) \frac{\mu_m + 1,5\mu_n}{\mu_m + \mu_n}, \quad (9)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса.

Сила, вызванная эффектом присоединенной массы из [1]

$$F_{pm} = \frac{2}{3} \pi R_m^3 \rho_M \frac{dw_k}{d\tau}. \quad (10)$$

Тогда уравнение (7) примет вид

$$F_{pr} - S_{mid} \xi \rho_M \frac{|w_k|}{2} w_k - \frac{2}{3} \pi R_m^3 \rho_M \frac{dw_k}{d\tau} = m_k \frac{dw_k}{d\tau}, \quad (11)$$

где  $m_k$  – масса капли.

Уравнение (11) позволяет определить скорость и ускорение капли в произвольный момент времени. При этом считаем, что капля воды, окруженная паровой прослойкой, движется как единое целое с данным объемом пара, т.е. не учитываем возможное существование «проскальзывания» между водой и паром при их движении (паровая оболочка движется, в то время как капля воды неподвижна). Рассматривая процессы перемещения капель

в плоскости, определенной осями  $x$  и  $y$ , принимаем, что скорость  $w_k$  и ускорение  $g_k$  движения капли, а также силы  $F$  из уравнения (11) являются положительными, если однонаправлены с осью  $x$ . В том случае, если перемещение осуществляется только вдоль оси  $y$ , положительным считаем направление данной оси.

Как указывалось выше, сила, которая может вызвать перемещение, изменяет как направление своего действия, так и угол этого действия. Поэтому, если частица движется под действием силы  $F_{pr}$  под определенным углом  $\theta$  к оси  $y$ , имея при этом скорость движения  $w_k$  и ускорение  $g_k$ , и в некоторый момент времени данная сила  $F_{pr}$  меняет свое направление, т.е. начинает действовать под углом  $\beta$ , то дальнейшее перемещение капли будет осуществляться вдоль оси, проходящей под углом  $\gamma$  к оси  $y$ , что показано на рис. 2.

Для определения угла  $\gamma$  разложим действующую силу  $F_{pr}$  и силу, вызванную движением капли  $F_k = m_k g_k$  на оси, и найдем результирующие силы по осям

$$\begin{aligned} F_{kx} &= m_k g_k \sin\theta; & F_{ky} &= m_k g_k \cos\theta; \\ F_{prx} &= F_{pr} \sin\beta; & F_{pry} &= F_{pr} \cos\beta; \end{aligned} \quad (12)$$

$$F_x = F_{kx} + F_{prx}; \quad F_y = F_{ky} + F_{pry}.$$

Тогда угол  $\gamma$  равен

$$\gamma = \begin{cases} \arctg \left| \frac{F_x}{F_y} \right|, & \frac{F_x}{F_y} > 0; \\ 180 - \arctg \left| \frac{F_x}{F_y} \right|, & \frac{F_x}{F_y} < 0; \\ 90, & F_y = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Вдоль оси  $x'$  (рис. 2) действующая сила  $F_{pr'}$ , а также скорость и ускорение частицы имеют значения

$$\begin{aligned} F_{pr'} &= F_{pr} \cos(|\gamma - \beta|); \\ w'_k &= w_k \cos(|\gamma - \theta|); \\ g'_k &= g_k \cos(|\gamma - \theta|). \end{aligned} \quad (14)$$

Данные значения  $F_{pr'}$ ,  $w'_k$ ,  $g'_k$  позволяют

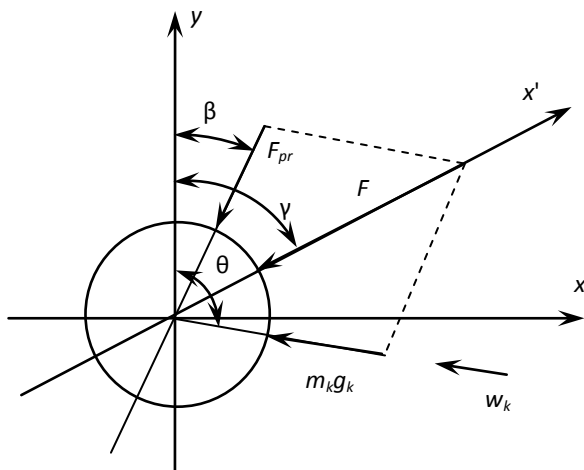


Рис. 2. К определению угла движения частицы (обозначения в тексте).

определить новое значение ускорения и скорости капли по уравнению (11). По этим определенным величинам можно найти перемещение капли вдоль осей  $x$  и  $y$  из уравнений

$$\frac{dx}{d\tau} = w_k \sin \gamma, \quad \frac{dy}{d\tau} = w_k \cos \gamma \quad (15)$$

Таким образом, уравнения (1) – (15) определяют перемещение в плоскости частицы при совместном их решении с уравнениями гидродинамики и тепломассопереноса частиц [4].

**Результаты расчетов**

Расчеты проводим для модели, представленной на рис. 1, в предположении того, что в начальный момент времени эмульсия находится при температуре  $t_0 = 105$  °С и соответствующем этой температуре давлении насыщения воды. В некоторый момент времени давление резко снижается до атмосферного, приводя к вскипанию водной фазы. Тем самым инициируются как процессы дробления, так и процессы перемещения частиц. Из расчетов [4] известно, что капля № 2 (рис. 1) будет раздроблена практически в момент сброса давления. Поэтому нумерация капель, начиная с № 2, снижается на единицу, т.е. капля № 3 будет называться каплей № 2 и т.д. При этом, если будет наблюдаться дробление других капель, то нумерация также будет уменьшаться на единицу, начиная с номера раздробленной капли. Результаты расчетов представлены на рис. 3-4. На данных рисунках

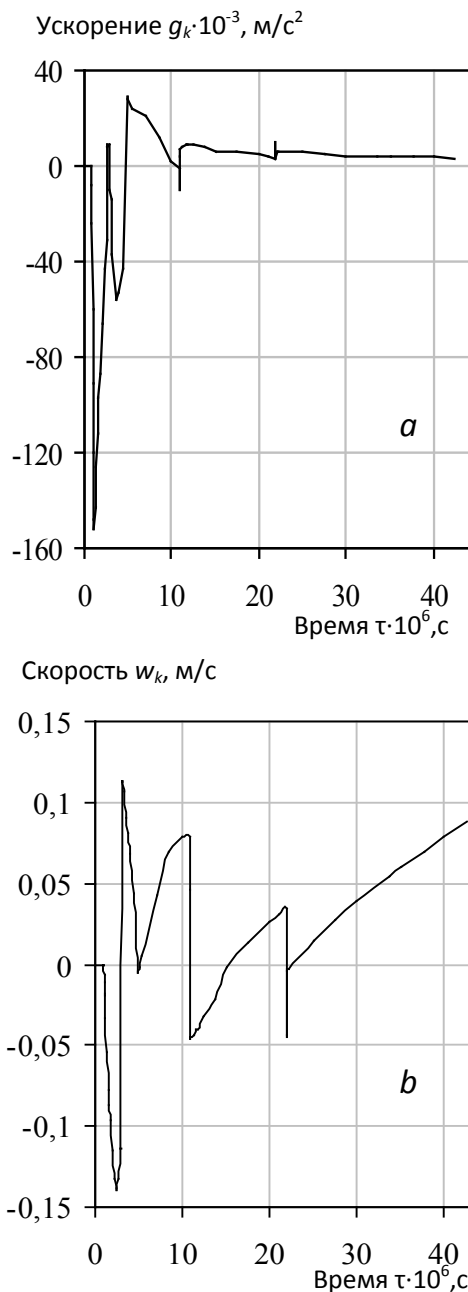
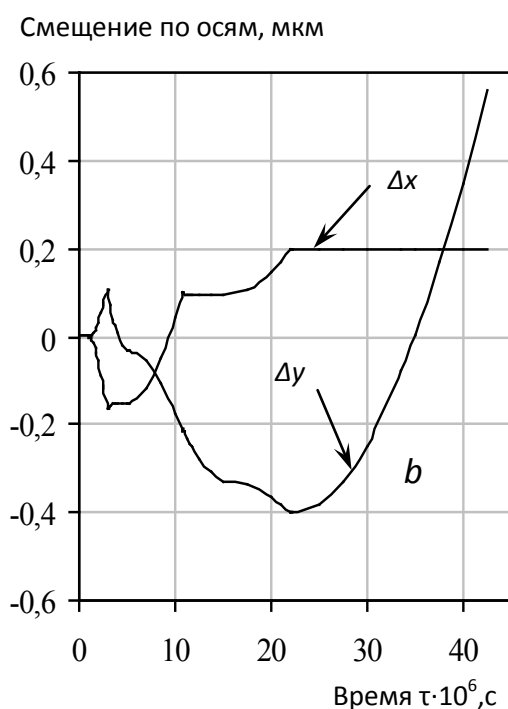
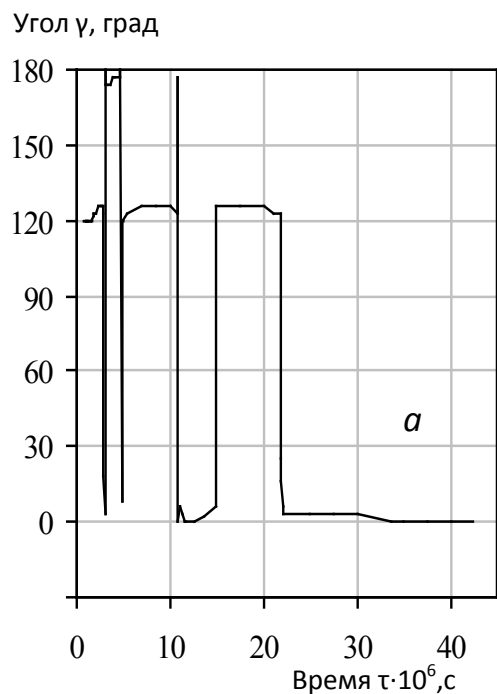


Рис. 3. Изменение ускорения (а) и скорости (b) капли с течением времени.

показано, как изменяется ускорение и скорость капли, а также угол ее движения и перемещение в плоскости по соответствующим осям с течением времени для капли № 3 из рис. 1 (или № 2 с учетом написанного выше). Как видно из этих рисунков, измеряемые величины изменяют как свое значение, так и направление. Так, например, сопоставляя рисунки 3, а и 3, b, можно показать, что рассматриваемая частица при



**Рис. 4. Изменение угла перемещения капли (а) и смещения по осям (б) во времени.**

превышении силой, действующей со стороны соседних частиц, силы противодействия самой закипающей капли, приобретает значительное ускорение и скорость. При этом, отрицательное значение скорости говорит о том, что капля

движется в направлении обратном оси  $x$ , а отрицательный знак ускорения при отрицательном значении скорости показывает не замедление, а ускорение данной частицы. Видимые скачки в изменении, как ускорения, так и скорости, можно связать с изменением угла действия силы и, как следствие, угла перемещения капли из рис. 4, а.

Например, в момент времени  $\tau \approx 3 \cdot 10^{-6}$  с происходит резкое изменение угла перемещения, но при этом показанная на рис. 4, а большая разница между минимальным и максимальным значениями угла  $\gamma$ , вовсе не означает, что данный угол изменяется на такую большую величину, а общая разность в углах перемещения составляет всего  $\approx 4^\circ$ . В целом же резкое изменение угла  $\gamma$  показывает, что угол перемещения капли стремится к углу действия силы и практически мгновенно его достигает. Данный угол показывает доминирующее действие силы, которая вызывает перемещение, от капель № 4 и 6 (соответствующие углы расположения  $\approx 177^\circ$  и  $\approx 120^\circ$ ).

Данные ускорения каплей и ее скорость могут стать причиной гидродинамической неустойчивости, если превысят значения критических параметров. Но, несмотря на то, что значение ускорения и велико, оно не достигает того критического порога, при котором наступает неустойчивость, из-за того, что рассматриваемая частица имеет достаточно малый размер. Пиковое значение ускорения достигает  $150000 \text{ м/с}^2$ , в то время как критическое значение равно  $g_{cr} \approx 350000 \text{ м/с}^2$ , и по скоростям  $w_k^{\max} \approx 0,14 \text{ м/с}$  и  $w_{cr} \approx 4,7 \text{ м/с}$ .

Как видно из рис. 4, б смещение по осям неоднозначно изменяется во времени, а видимые изгибы в изменении  $\Delta x(\tau)$  и  $\Delta y(\tau)$  согласуются с изменением угла действующей силы. Максимальное значение смещения до момента встречи с другой частицей не так и велико ( $\approx 0,6$  мкм по оси  $y$ ). Учитывая, что таким смещением обладает капля, которая имеет практически меньшее значение радиуса из рассматриваемых каплей, то для данной температуры можно пренебречь смещениями больших каплей в пределах до  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  с, но до

этого момента времени они, возможно, сольются друг с другом. Понятно также, что большие капли не будут перемещаться так быстро, как малые, но и перемещение малых капель в основном осуществляется из-за того, что они очень быстро, в сравнении с большими, уравновешивают свое значение ускорения и скорости до равновесных.

### **Выводы**

Таким образом, смещение капель при малых перепадах давления невелико, но для значительных перепадов сброса давления может оказаться достаточно большим, так же как и значения скорости и ускорения, что может привести к эффектам гидродинамического дробления частицы. Но, при больших перепадах давления возможно дробление больших капель, в то время как малые остаются целыми, и их перемещение будет ничтожным до момента следующего появления парового слоя на раздро-

бленных частицах. В целом же учет смещения капель приводит к более детальному и точному изучению процесса закипания термолабильной части эмульсии и дробления дисперсной фазы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Накорчевский А.И., Басок Б.И.* Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. – Киев, Наукова думка, 2001. – 348с.
2. *Иваницкий Г.К.* Моделирование процессов деформирования и дробления капель при движении в жидкости. // Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 1. – С. 9 – 16.
3. *Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И.* Теплофизические процессы в эмульсиях. – К.: Наукова думка, – 2005. – 265 с.
4. *Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И.* Кинетика испарения в процессах гомогенизации // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 6. – С. 14 – 20.

*Получено 17.10.2011 г.*