

УДК 621.01.216

ПАВЛЕНКО А.М.¹,
КЛИМОВ Р.А.¹, БАСОК Б.И.²

¹Днепродзержинский государственный технический университет²Институт технической теплофизики НАН Украины

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАПЕЛЬ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ПРИ ЗАКИПАНИИ ЭМУЛЬСИИ

Розглянуто процеси динамічної взаємодії між закипаючими частинками дисперсної фази емульсії, що призводять до їх подрібнення. Вказано на відмінності у розгляді сил, які визначають подрібнення незакипаючих і закипаючих крапель. Визначено можливість використання моделі для опису процесів переміщення, деформації або подрібнення включення дисперсної фази під впливом сусідніх частинок.

Рассмотрены процессы динамического взаимодействия между закипающими частицами дисперсной фазы эмульсии, приводящие к дроблению. Указано на различия в рассмотрении сил, определяющих дробление незакипающих и закипающих капель. Определена возможность использования модели для описания процессов перемещения, деформации либо дробления включения дисперсной фазы под воздействием соседних частиц.

In the given work the consideration of processes of dynamic cooperation between the particles of dispersion phase of emulsion beginning to boil, resulting in crushing of large particles, is offered. It is indicated on distinctions in consideration of forces determining crushing of drops not beginning to boil and beginning to boil. Possibility of the use of model for determination of processes of moving, deformation or crushing of inclusion of dispersion phase under act of great number of neighboring particles is certain.

d – радиус-вектор;
 F – сила;
 g – ускорение;
 k – поправка на нормальную составляющую;
 p – давление;
 R, r – радиус;
 t – температура;
 w – скорость движения;
 x, y – координата;
 β – угол;
 ρ – плотность;
 σ – межфазное натяжение;
 τ – время.

Нижние индексы:

0 – начальное значение;
 $i = 1, 2, \dots, 6$ – номер капли;
 Bo – Бонда;
 We – Вебера;
 cr – критическое;
 d – определяющая;
 n – номер рассматриваемой капли;
 nr – нормальная;
 p – результирующая;
 s – поверхность;
 m – масло;
 ∞ – бесконечность.

В промышленности широкое применение находят смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), которые снижают износ режущего инструмента и улучшают качество обрабатываемых поверхностей как в технологии металлообработки, так и других производствах [1]. Для достижения наибольшего эффекта СОЖ должны обладать хорошей смачиваемостью поверхности. Этого достигают введением в СОЖ соответствующих

поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые также повышают и охлаждающую способность среды. В основе смазывающего действия различных компонентов СОЖ лежат явления адсорбции. Для жидкостей адсорбция определяется по изменению поверхностного натяжения σ от концентрации ПАВ. Явления десорбции ПАВ и укрупнения частиц дисперсной фазы СОЖ, которая представляет собой эмульсию, определяют

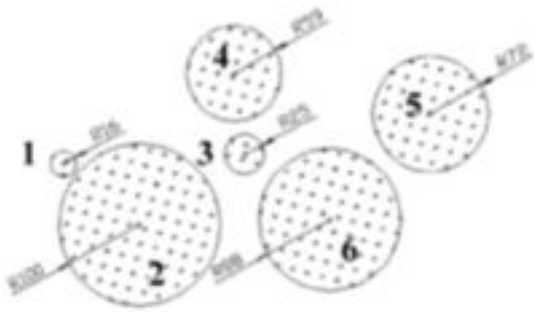


Рис. 1. К расчетной модели дробления капель дисперсной фазы эмульсии (характерные размеры в микронах): 1...6 – номера капли.

устойчивость эмульсии к расслоению и дальнейшему ее использованию. Для снижения материальных затрат производства экономически целесообразным является повторное использование отработанных СОЖ. Для этого их составы необходимо привести к нормативным, т.е. очистить от механических примесей, а также получить наиболее устойчивую к расслоению структуру, т.е. получить наименьший размер дисперсной фазы. Поэтому изучение процессов дробления капель дискретно распределенной фазы является важным для определения оптимальных режимов диспергирования, что влечет за собой значительное снижение затрат энергии как при самом процессе измельчения и дробления, так и финансовых затрат при многократном использовании одной и той же СОЖ, предварительно подготовленной перед каждым циклом использования.

Постановка задачи

Проведем исследование дробления капель дисперсной фазы, находящихся в окружении других капель при их закипании. В качестве объекта исследования примем эмульсию, рассмотренную в [2] и схематически представленную на рис. 1.

Как видно из данного рисунка, между “большими” каплями находятся “малые” капли, которые могут служить источниками повышенных динамических сил при закипании и тем самым инициировать процессы дробления более крупных капель из-за значительной разности в ускорениях и/или скоростях роста между ними [3]. Основными видами неустойчивости будем счи-

тать неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, вызванную разностью скоростей, и неустойчивость Релея-Тейлора, которая вызвана разностью ускорений [2]. Рассматривая каплю эмульсии, можно сделать вывод о том, что основное влияние на процесс ее разрушения будут оказывать силы, действующие по нормальной составляющей к поверхности капли, т.е. силы, направленные либо к центру капли, либо от него. Ускорение и скорость как показатели сил, действующих на поверхность капли от нескольких источников, определяются выражениями:

$$g_{nr}(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^{N-1} g_i(x_0, y_0) k_{nr_i};$$

$$w_{nr}(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^{N-1} w_i(x_0, y_0) k_{nr_i}, \quad (1)$$

где x_0, y_0 – координаты точки на поверхности капли; g – ускорение в искомой точке, действующее от какого-либо источника; w – скорость, действующая в данной точке от источника; k_{nr} – поправка на нормальную составляющую; N – общее число закипающих капель дисперсной фазы.

Действующие на поверхность частицы ускорение и скорость определяются выражениями [3]

$$g_i(d_i) = \left[p_{R_i} - p_\infty + 0,5w_{R_i}^2 \rho_m \left(1 - \frac{4R_i^3}{d_i^3} \right) \right] \frac{R_i}{\rho_m d_i^2};$$

$$w_i(d_i) = \frac{w_{R_i} R_i^2}{d_i^2}, \quad (2)$$

где $d_i(x_0, y_0)$ – радиус-вектор от центра i -ой капли до поверхности рассматриваемой частицы.

Важным является рассмотрение сил, действующих на противоположные стороны включения. Принимая переменным угол β (угол между вертикальной осью и направлением действия силы), можно определить координаты искомых противоположных точек поверхности частицы:

$$x_{s1} = x_n + \Delta x, \quad y_{s1} = y_n + \Delta y,$$

$$x_{s2} = x_n - \Delta x, \quad y_{s2} = y_n - \Delta y,$$

$$\Delta x = R_n \sin \beta; \quad \Delta y = R_n \cos \beta; \quad 0 \leq \beta < 180^\circ, \quad (3)$$

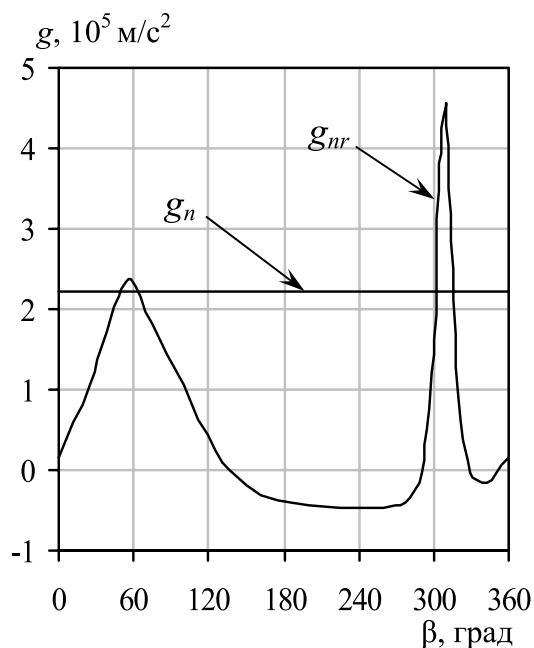


Рис. 2. Профиль ускорения, действующего на поверхность капли №2 (рис. 1) от соседних закипающих частиц (g_{nr}), и ускорение противодействия самой частицы (g_n).

где x_n, y_n — координаты данной частицы; x_{s_1}, y_{s_1} — координаты поверхности одной стороны капли; x_{s_2}, y_{s_2} — координаты противоположной стороны. Тогда поправка k_{nr} будет определяться выражением

$$k_{nr} = \frac{(x_i - x_{s_1,s_2}) \sin \beta + (y_i - y_{s_1,s_2}) \cos \beta}{d_i(x_{s_1,s_2}, y_{s_1,s_2})}. \quad (4)$$

С помощью уравнений (1)-(4) можно определить профиль ускорений на поверхности рассматриваемой капли. Результаты расчетов по уравнениям (1)-(4) для частицы №2 (рис. 1) представлены на рис. 2.

При этом для расчета принималось, что рассматриваемая система, состоящая из 6 частиц, в начальный момент времени находится под давлением, которое соответствует давлению насыщения термолабильной (водной) фазы эмульсии при температуре $t_0 = 105^\circ\text{C}$. В некоторый момент времени давление резко снижается до атмосферного, в результате чего вода оказывается перегретой относительно температуры насыщения при атмосферном давлении, что приводит к появлению и интенсивному росту паровой фазы.

Для расчета было принято начальное существование паровой прослойки (1 мкм) на всех рассматриваемых частицах при начальной температуре и давлении насыщения. Результаты расчетов приведены для начального момента сброса давления.

На рис. 2 видно четко прослеживаемую зависимость между углами расположения капель относительно рассматриваемой и величиной действующего от них ускорения. Существует сразу два максимума ускорений — угол $\beta \approx 57^\circ$ и $\beta \approx 310^\circ$, что соответствует углам расположения ближайших соседних капель (№1 и №3 соответственно, рис. 1). Понятно, что доминировать будет сила, вызванная максимальным ускорением, т.е. тем максимумом, который расположен под углом $\beta \approx 310^\circ$. Но в данном случае следует учитывать и силу, которая действует на противоположную сторону включения. Рассмотрим принципиальные различия в принятии определяющих сил, действующих на незакипающее и закипающее включения дисперсной фазы эмульсии.

Находя, например, ускорение и вызванную им силу на одной стороне капли и противоположной стороне, будем считать, что если две противоположные силы направлены к центру рассматриваемой капли, то общая сила, действующая на каплю, равна сумме данных двух сил. Если обе силы направлены от центра капли, то общая сила также равна сумме двух векторных сил. В том случае, если обе силы действуют разнонаправленно по отношению к центру капли, т.е. однонаправлены в пространстве, определяющей будем считать ту силу, которая имеет большее значение из двух действующих. Таким образом, на включение дисперсной фазы, которое не закипает (т.е. не создает никакого противодействия силам, действующим на него), определяющим воздействием, приводящим к возможному разрушению, будет максимум двух сил, которые действуют на противоположные стороны, при условиях, описанных выше.

В случае же, когда капля эмульсии начинает закипать, она имеет свою силу, которая будет противодействовать внешнему воздействию со стороны других источников. Тогда определяющей силой может быть та, которая действует на одну сторону включения и превышает силу про-

тивоводействия. Все это является основным отличием в рассмотрении сил, действующих на закипающую каплю в отличие от незакипающей капли. Это означает, что необходимо учитывать два данных максимума и определять из них главный. Возможно совпадение этих максимумов сил.

Учитывая принятый в [3] факт о том, что сила действия самой капли не может себя разрушить, можно записать уравнения, которые будут определять ускорения и скорости, действующие на включение дисперсной фазы и приводящие к его разрушению. Принимая, что если результирующее ускорение или скорость положительны, то они являются причиной возникновения неустойчивости, а если они отрицательны, то никакого дестабилизирующего эффекта нет, можно записать:

$$g_{p1} = \begin{cases} g_{s1} - g_n; g_n \geq 0, g_{s1} \geq 0, \\ -g_{s1}; g_n > 0, g_{s1} < 0, \\ g_{s1}; g_n < 0, g_{s1} > 0, \\ g_n - g_{s1}; g_n \leq 0, g_{s1} \leq 0, \end{cases} \quad (5)$$

где g_{p1} – результирующее ускорение, действующее на одну сторону включения; g_n – ускорение границы раздела масло-пар рассматриваемого включения.

Для противоположной стороны можно записать уравнение, аналогичное (5), подставив g_{p2} и g_{s2} вместо g_{p1} и g_{s1} соответственно.

Тогда общее ускорение, действующее на каплю, определяется уравнением

$$\Delta g = g_{p1} + g_{p2}, \quad (6)$$

с необходимыми условиями, принимая коэффициент $Z = \frac{g_{s1}}{g_{s2}}$:

$$g_{p1} = \begin{cases} 0; Z < 0, |g_{s1}| - |g_{s2}| < 0; \\ 0; Z > 0: \begin{cases} g_n > 0, g_{s1} > 0, g_{s2} > 0, \\ g_{s1} - g_n < 0, g_{s2} - g_n > 0; \\ g_n < 0, g_{s1} < 0, g_{s2} < 0, \\ g_{s1} - g_n > 0, g_{s2} - g_n < 0; \end{cases} \end{cases}$$

$$g_{p2} = \begin{cases} 0; Z < 0, |g_{s1}| - |g_{s2}| > 0; \\ 0; Z > 0: \begin{cases} g_n > 0, g_{s1} > 0, g_{s2} > 0, \\ g_{s1} - g_n > 0, g_{s2} - g_n < 0; \\ g_n < 0, g_{s1} < 0, g_{s2} < 0, \\ g_{s1} - g_n < 0, g_{s2} - g_n > 0. \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

При несовпадении максимумов сил (ускорений, скоростей), действующих на противоположные стороны включения и с одной стороны, считаем определяющей ту общую силу, которая имеет большее значение:

$$g_d = \begin{cases} \Delta g_1, \Delta g_1 > \Delta g_2; \\ \Delta g_2, \Delta g_1 < \Delta g_2, \end{cases} \quad (8)$$

где $\Delta g_1, \Delta g_2$ – общие действующие на каплю ускорения, рассчитанные по максимумам, действующим на противоположные стороны и с одной стороны, соответственно.

Аналогично можно получить уравнения для скорости. При этом в уравнениях (5)–(8) необходимо произвести замену ускорений “g” на скорости “w”, а уравнение (6) представить в виде

$$\Delta w = k \sqrt{w_{p1}^2 + w_{p2}^2}, \quad (9)$$

$$\text{где } k = \begin{cases} +1, w_p \geq 0; \\ -1, w_p < 0, \end{cases} \quad w_p = w_{p1} |w_{p1}| + w_{p2} |w_{p2}|.$$

Были проведены исследования изменения сил, действующих на каплю с течением времени, а также изменения угла максимального воздействия силы. Силы, вызванные ускорением, играют определяющую роль (в сравнении с силами динамического напора), их рассчитываем по уравнениям [3]. Для данных условий силы, действующие на разные стороны поверхности рассматриваемой частицы, равны:

$$F_{g1} = 4\pi R_n^3 \rho_m g_{s1}, \quad (10)$$

$$F_{g2} = 4\pi R_n^3 \rho_m g_{s2}. \quad (11)$$

Сила противодействия со стороны границы раздела масло-пар самой капли

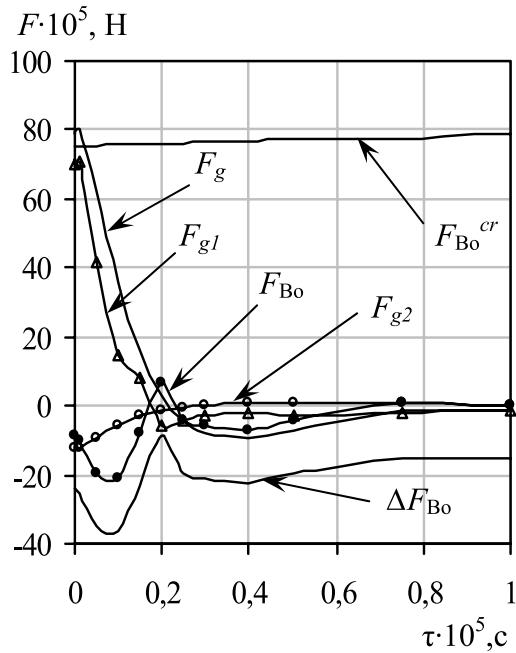


Рис. 3. Изменение во времени сил, действующих на каплю №4 (рис. 1).

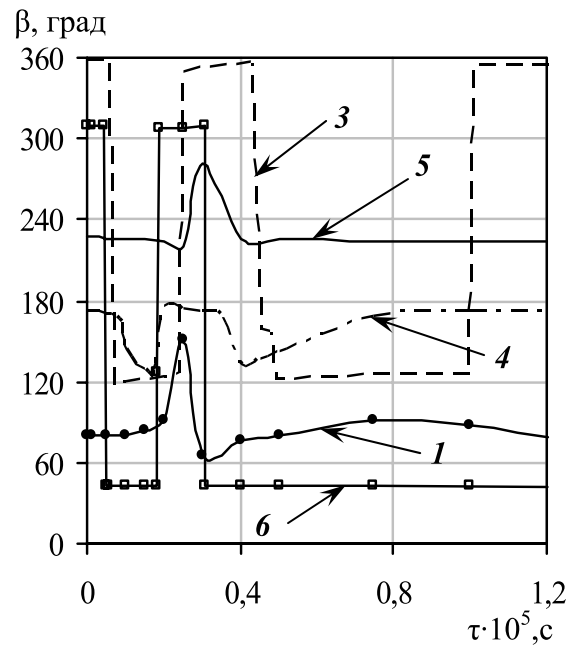


Рис. 4. Изменение во времени угла действия максимальной силы для частиц 1, 3-6 (рис. 1).

$$F_g = 4\pi R_n^3 \rho_m g_n \quad (12)$$

Общая действующая на каплю сила

$$F_{Bo} = 4\pi R_n^3 \rho_m g_d \quad (13)$$

Критическая сила, вызывающая неустойчивость по Бонду:

$$F_{Bo}^{cr} = 40\pi\sigma R_n \quad (14)$$

Сила, определяющая деформацию либо перемещение капли:

$$\Delta F_{Bo} = F_{Bo} - 8\pi\sigma R_n \quad (15)$$

Расчет проводим либо до выполнения условия

$$F_{Bo} \geq F_{Bo}^{cr} \quad (16)$$

либо до взаимной встречи капель, определяемой условием:

$$\Delta R_{i,j} \leq 0 \quad (17)$$

где $\Delta R_{i,j} = d_{i,j} - (R_{ni} + R_{nj})$,

$$d_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} ; i = 1, 2 \dots N ;$$

$j = i + 1, i + 2 \dots N$; i, j – номера капель с соответствующими координатами $x_i, y_i; x_j, y_j$.

Результаты расчетов

Результаты расчетов по уравнениям (1) – (17) совместно с уравнениями модели [4] представлены на рис. 3-4. При этом расчет проводился для $t_0 = 105$ °С.

Из рис. 3 видно, что критическая сила F_{Bo}^{cr} с течением времени увеличивается, что связано с увеличением радиуса рассматриваемой капли, а величины сил, действующих на каплю, стремятся во времени к нулю. Поэтому можно сделать вывод о том, что если не учитывать дальнейшего взаимодействия капель между собой при их соприкосновении, то при $t_0 = 105$ °С (если в начальные моменты сброса давления системы дробления крупных капель не произойдет) до момента соприкосновения они уже не разрушатся. Кривые изменения F_{g1}, F_{g2} указывают на тот максимум силы, который действует в данный момент времени. Эти кривые определяют преобладание данных сил над силой противодействия F_g либо их малость в сравнении с этой силой. Они

также не определяют силу, действующую под одинаковым углом β , так как в большей степени зависят от данного угла, что показано на рис. 4. Но совместное их рассмотрение позволяет определить силу F_{Bo} , которая в свою очередь и играет основную роль в данном процессе. Видно, что для капли №4 (рис. 3) при положительном значении силы F_{Bo} возможно лишь ее перемещение, на что указывает отрицательный знак ΔF_{Bo} .

Также наблюдается наиболее резкое изменение угла действия максимальной силы, в особенности для капель №3 и 6 (рис. 4). При этом частица №2 была раздроблена практически в начальный момент времени, и поэтому графика изменения угла действия максимальной силы на рис. 4 для нее не приведено. Для примера рассмотрим каплю №6. Как видно из рис. 4, с изменением угла действия максимальной силы изменяется доминирующее воздействие либо пятой капли ($\beta \approx 40^\circ$), либо третьей совместно с четвертой ($\beta \approx 300^\circ$). Первый пик изменения угла β при $\tau \approx 0,05 \cdot 10^{-5}$ с можно объяснить резким снижением ускорения границы капли №3 и дальнейшим преобладающим действием от частицы №5, после чего при $\tau \approx 1,8 \cdot 10^{-6}$ с наибольшее усилие оказывает третья частица.

В то же время, несмотря на резкое изменение угла β действия максимальной силы у частиц №3 и 6, у №5 данный угол изменяется достаточно плавно, большую часть времени равен $\approx 230^\circ$, т.е. в области действия максимального усилия от капли №6.

Можно сделать вывод о том, что угол β может резко изменяться только у тех капель, которые находятся в окружении других, тогда как капли, находящиеся на “окраине”, угол действия максимальной силы будут изменять на небольшую величину. Это объясняется тем, что для капель, находящихся внутри эмульсии, может достаточно быстро как по значению, так и по направлению изменяться максимум силы, вследствие достаточно близкого расположения соседних капель, которые изменяют свое доминирующее влияние на данную частицу. В то же время капли, находящиеся в наружных слоях, имеют соседей на малой доле своей окружности, что и предопределяет небольшое значение изменения угла действия максимальной силы.

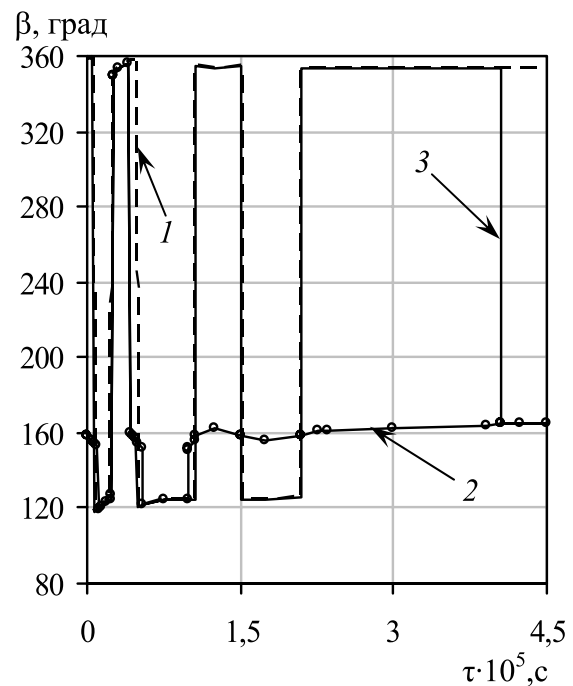


Рис. 5. Изменение во времени угла действия максимальной силы для частицы №3 (рис. 1), действующей на одну сторону (1) и на противоположные стороны включения (2), а также угла действия определяющей силы для расчета (3).

На рис. 5 показано, как изменяется угол действия максимальной силы, действующей на одну сторону включения $F_{\Delta g_2}$ и на противоположные стороны $F_{\Delta g_1}$.

Видно, что не существует четкой зависимости между углами действия данных сил, они могут как совпадать, так и существенно отличаться. Поэтому необходимо рассматривать наибольший максимум силы и угол его действия.

Проведенные расчеты для температур $t_0 = 180^\circ\text{C}$ и $t_0 = 130^\circ\text{C}$ показали, что в момент мгновенного сброса давления практически все крупные капли будут раздроблены, в то время как при $t_0 = 105^\circ\text{C}$ будет раздроблена лишь самая крупная капля из-за максимального приближения к ней самой малой частицы.

Выводы

Рассмотрена модель дробления крупных включений дисперсной фазы эмульсии при ди-

намическом воздействии со стороны соседних закипающих частиц. Рассчитаны углы действия максимальных сил. Установлено, что процесс дробления закипающих включений протекает при различных максимумах усилий (различных углах β) в сравнении с незакипающими частицами. Это указывает на необходимость нахождения как минимум двух максимальных усилий, которые могут совпадать по углу своего действия на каплю либо значительно различаться по этому углу. Конечно, необходим учет как деформации поверхности включений, так и их перемещения, а также неравномерности при закипании капель различных размеров. Большое значение имеют также ПАВ, которые позволяют раздробить частицу при гораздо меньших прикладываемых к ней усилиях со стороны других закипающих включений. Остается открытым вопрос о поведении двух и более капель при их сближении, а также влиянии соседей на рост данной капли. Учет этих явлений позволит еще более детально и точ-

но рассматривать процессы роста и дробления включений дисперсной фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смазочно-охлаждающие* технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтелеса – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
2. *Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И.* Теплофизические процессы в эмульсиях. – К.: Наукова думка, 2005. – 265 с.
3. *Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И.* Дробление дисперсной фазы при вскипании эмульсии // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №3. – С.14-22.
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 24.07.2007 г.

УДК 536.24:533.6.011

**ПИСЬМЕННЫЙ Е.Н., ТЕРЕХ А.М.,
РОГАЧЕВ В.А., БУРЛЕЙ В.Д., РАЛЬЧУК В.В.**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ШАХМАТНЫХ ПУЧКАХ ТРУБ СО СПИРАЛЬНО-ЛЕНТОЧНЫМ РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Запропоновано узагальнюючі експериментальні залежності для визначення аеродинамічного опору шахових пучків труб з розрізним спірально-стрічковим оребрінням в інтервалах змінення числа Рейнольдса $Re_e = (5...50) \cdot 10^3$ параметра розміщення $S_1/S_2 = 0,8...2,5$, приведеної довжини $H/F = 5...39$.

Предложены обобщающие зависимости для определения аэродинамического сопротивления шахматных пучков труб с разрезным спирально-ленточным оребрением в интервалах изменения числа Рейнольдса $Re_e = (5...50) \cdot 10^3$, параметра размещения $S_1/S_2 = 0,8...2,5$, приведенной длины $H/F = 5...39$.

Generalized relations for determining aerodynamic resistance of staggered cross-flow tube bundles with cut spiral-band fins are considered. It is guided by results of the experimental investigation in the value interval of Reynolds number $Re_e = (5...50) \cdot 10^3$ with placement parameters $S_1/S_2 = 0.8...2.5$ and reduced length $H/F = 5...39$.