

УДК 621.01.216

Павленко А.М.^{1.}, Климов Р.А.^{1.}, Басок Б.И.²¹Днепродзержинский государственный технический университет²Институт технической теплофизики НАН УкраиныПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ КОНГЛОМЕРАТА КАПЕЛЬ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ
ПРИ АДИАБАТИЧЕСКОМ ЗАКИПАНИИ ЭМУЛЬСИИ

В даній роботі запропонована методика розрахунку параметрів адиабатично закипаючих часток дисперсної фази емульсії при їх злипанні та подальшому утворенні конгломерату.

В данной работе предложена методика расчета параметров адиабатически закипающих частиц дисперсной фазы эмульсии при их слиянии и дальнейшем образовании конгломерата.

In this work there is offered the method of parameters calculation of adiabatically beginning to boil particles of emulsion dispersion phase at their sticking together and subsequent conglomerates formation.

Введение

Сложные и разнообразные физико-химические явления, определяющие устойчивость тонких разделяющих пленок жидкости и структуру двухфазных потоков, в настоящий момент времени остаются до конца не изученными. В качественном отношении этот вопрос рассмотрен в [1, 2] (теория Дерягина, Ландау, Фервейя, Овербека). Согласно этой теории устойчивость дисперсных систем определяется действием электростатических сил отталкивания ионных зарядов в электролите и Ван-дер-Ваальсовых сил молекулярного притяжения. Силы притяжения обуславливают дестабилизирующий эффект, который приводит к коагуляции частиц. Кулоновские силы отталкивания обеспечивают стабилизирующий эффект в области относительно больших значений межпузырьковых расстояний. Данные силы имеют наибольшее влияние при межпузырьковых расстояниях порядка $10^{-9} \dots 10^{-7}$ м, при этом важно знать каким потенциалом обладает ПАВ [1]. Расстояния действия данных сил достаточно малы и эти силы остаются еще более неопределенными при разных радиусах взаимодействующих частиц, т.к. вся теория разработана для двух частиц одинакового размера. Поэтому указанные силы для больших расстояний можно не учитывать.

В процессах вскипания эмульсий типа вода-масло в результате резкого сброса давления происходит образование паровой прослойки на

границе раздела фаз масло-вода. Увеличение парового объема (рост радиуса границы раздела масло-пар) для капель различных размеров происходит при параметрах, свойственных каждой частице в определенный момент времени. При слиянии капель в конгломерат происходит усреднение параметров, а следствием является появление более крупной капли со своими скоростями и ускорениями роста. Поэтому рассмотрение данных процессов объединение закипающих частиц играет достаточно большую роль в определении конечного размера раздробленных частиц дисперсной фазы, а сам процесс является неотъемлемой частью как вскипания, так и перемещения, и последующего дробления капель.

Постановка задачи

Рассмотрим две частицы разного размера, которые сливаются друг с другом, и определим параметры образующейся частицы.

Суммарные объем и масса воды после слияния

$$V_{\sigma} = \sum_{i=1}^2 \frac{4}{3} \pi R_i^3, m_{\sigma} = V_{\sigma} \rho_{\sigma}, i = 1, 2, \quad (1)$$

где R_1 – радиус капли воды.

Для определения температуры воды, образующейся частицы, определим средние температуры по сечению капель воды исходных частиц. При известном числе расчетных делений сечения капли воды и известных температурах в каждом слое из данных делений, средняя температура объема воды каждой исходной

частицы определится выражением

$$t_{sr_i} = \frac{\sum_{n=1}^{N_i} t_{n_i}}{N_i}, \quad (2)$$

где N_i – число делений данного сечения объема воды частицы.

Тогда средняя температура, образующегося объема воды, в предположении равенства теплоемкостей, определится из уравнения теплового баланса

$$t_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^2 m_{\epsilon_i} t_{sr_i}}{m_{\epsilon\Sigma}}. \quad (3)$$

Суммарный объем воды определяет радиус образующейся капли воды

$$R_1 = \left(\frac{3}{4\pi} V_{\epsilon\Sigma} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

Уравнения (1) – (4) определяют образующиеся значения радиуса капли воды и температуры данного объема. Для дальнейшего расчета принимаем температуру по сечению капли воды равной средней t_{sr} . Данное предположение основано на факте полного взаимного перемешивания двух объемов воды, в результате чего их температура определится значением t_{sr} .

Масса пара в каждой частице можно определить с помощью модели [3]. Тогда суммарные объем и масса пара равны

$$V_{n\Sigma} = \frac{4}{3} \pi \sum_{i=1}^2 (R_{2_i}^3 - R_{1_i}^3), \quad m_{n\Sigma} = \sum_{i=1}^2 m_{n_i}, \quad (5)$$

где R_2 – радиус границы раздела масло-пар.

Суммарный объем пара, совместно с известным радиусом R_1 , определяют общий радиус образующейся капли эмульсии

$$R_2 = \left(\frac{3}{4\pi} V_{n\Sigma} + R_1^3 \right)^{1/3}. \quad (6)$$

Плотность пара образующейся капли

$$\rho_n = m_{n\Sigma} / V_{n\Sigma}. \quad (7)$$

Температура пара новой капли определяет-

ся из уравнения теплового баланса в предположении того, что температуры пара исходных объемов постоянны по их сечению. Тогда

$$t_n = \frac{\sum_{i=1}^2 m_{n_i} t_{n_i}}{m_{n\Sigma}}. \quad (8)$$

По известным температуре и плотности пара можно определить давление пара. Уравнения (5) – (8) определяют общий радиус новой частицы, а также термодинамические параметры ее состояния.

Количество теплоты, поступающей от масла к пару, определим из теплового баланса при известных исходных значениях H [3] каждой из частиц. Тогда

$$H = H_1 + H_2. \quad (9)$$

Полученное количество теплоты позволяет определить глубину проникания и новое значение теплового потока Q_m , поступающего от масла к пару [3].

Для определения скорости движения границы раздела масло-пар w_2 суммируем кинетические энергии движения данных границ каждой из исходных частиц. Кинетическая энергия каждой частицы определяется выражением [4]

$$E_{k_i} = \frac{1}{2} \rho_{.m} \int_{R_{2_i}}^{\infty} 4\pi w^2 r^2 dr = 2\pi \rho_{.m} w_{2_i}^2 R_{2_i}^3, \quad (10)$$

или в данном случае

$$E_{k_i} = 2\pi \rho_{.m} |w_{2_i}| w_{2_i} R_{2_i}^3, \quad i = 1, 2. \quad (11)$$

Тогда скорость w_2 равна

$$w_2 = h \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^2 E_{k_i}}{R_2^3}}, \quad h = \begin{cases} 1, & \sum E_{k_i} > 0; \\ -1, & \sum E_{k_i} < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Координаты центра новой капли найдем из соотношения сил без учета ускорения капель

$$d(x, y)' = \frac{m_{\epsilon_2} + m_{n_2}}{(m_{\epsilon_1} + m_{n_1}) + (m_{\epsilon_2} + m_{n_2})} d(x, y), \quad (13)$$

где $d(x, y)'$ – расстояние от центра капли 1 до центра новой капли; $d(x, y)$ – расстояние от центра капли 1 до центра капли 2.

Введем обозначение

$$M = \frac{m_{e_2} + m_{n_2}}{(m_{e_1} + m_{n_1}) + (m_{e_2} + m_{n_2})} = \frac{m_{en_2}}{\sum_{i=1}^2 m_{en_i}}. \quad (14)$$

Тогда с учетом рассмотрения геометрической теории подобия треугольников получим координаты центра новой капли

$$x = (x_2 - x_1)M + x_1, \quad y = (y_2 - y_1)M + y_1. \quad (15)$$

Проекция вектора скорости движения образовавшейся капли на оси x и y определим, используя теорему импульсов

$$w_{kx} = \frac{\sum_{i=1}^2 m_{en_i} w_{k_i} \sin \gamma_i}{\sum_{i=1}^2 m_{en_i}}, \quad w_{ky} = \frac{\sum_{i=1}^2 m_{en_i} w_{k_i} \cos \gamma_i}{\sum_{i=1}^2 m_{en_i}}, \quad (16)$$

где угол γ_i определяется по методу, изложенному в [5].

Тогда скорость движения образовавшейся капли равна

$$w_k = \sqrt{w_{kx}^2 + w_{ky}^2}. \quad (17)$$

Таким образом, уравнения (1) – (17) позволяют определить параметры новообразован-

ной капли.

Результаты расчетов

Проводим расчеты для модели, представленной на рис. 1 в соответствии с уравнениями [3] при $t_0 = 105^\circ\text{C}$ с учетом сил, которые могут вызвать неустойчивость, и сил, вызывающих перемещение, т.е. с учетом смещения по осям, а также с учетом слияния капель. Считаем, что если капля раздроблена, либо слилась с другой, то нумерацию капель уменьшаем на единицу, начиная с номера капли, которая раздроблена, либо с наименьшего из номеров капель, которые слились. Как показали расчеты [3] капля № 2 будет раздроблена в начальный момент

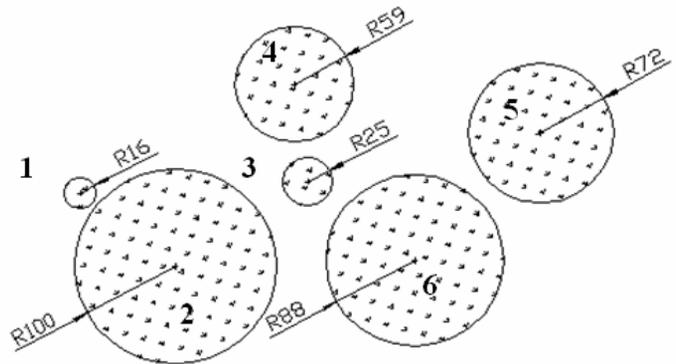


Рис. 1. К расчетной модели слияния капель дисперсной фазы эмульсии (характерные размеры приведены в микронах возле обозначения радиуса).

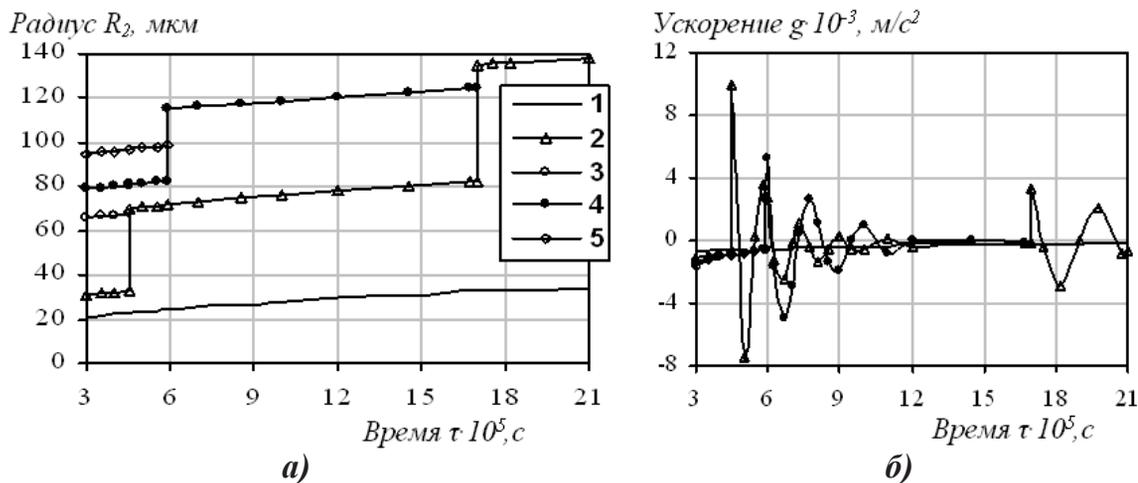
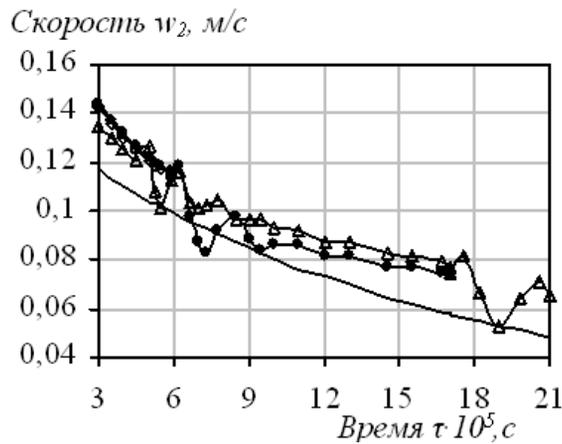
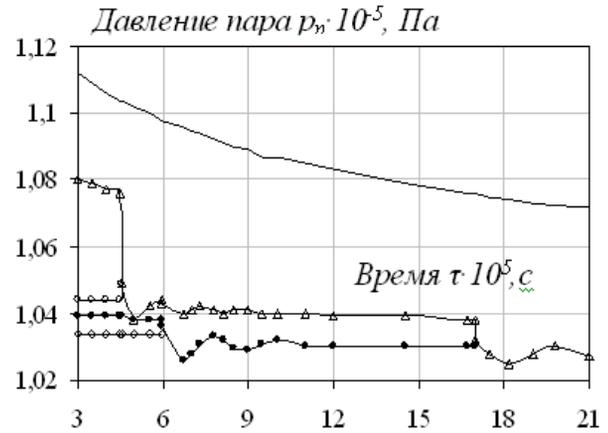


Рис. 2. Изменение радиуса капли (а) и ускорения границы раздела масло-пар (б) при слиянии капель во времени в результате образования конгломерата (номера линий соответствуют первоначальным номерам капель).



а)



б)

Рис. 3. Изменение скорости границы раздела масло-пар (а) и давления пара (б) при слиянии капель во времени (обозначения из рис. 2).

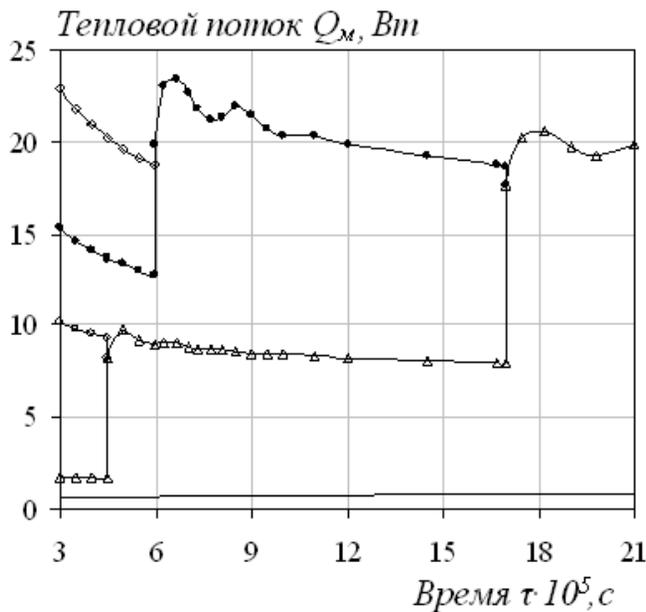


Рис. 4. Изменение во времени теплового потока от масла к пару при слиянии капель (обозначения из рис. 2).

времени, поэтому № 2 будет № 3 и т.д.

Результаты расчетов представлены на рис. 2–4.

На данных рисунках четко видны моменты слияния капель: сначала № 2 с № 3, далее № 4 с 5, потом № 2 с 4 и т.д. В момент слияния двух капель, после образования новой капли, уско-

рение границы раздела масло-пар (рис. 2, б) скачкообразно возрастает, что объясняется резким снижением силы Лапласа, которая входит в уравнение Релея-Плессета, из-за резкого увеличения радиуса границы раздела. Как видно из рис. 3, б, основной термодинамический параметр (давление p) в момент слияния определяется значениями между двумя первоначально существующими.

Тепловой поток от масла к пару может иметь результирующее значение как между двумя исходными, так и выше наибольшего из исходных (рис. 4), что можно объяснить определяющим значением радиуса образовавшейся частицы. Например, для $\tau \approx 6 \cdot 10^{-5}$ с при слиянии капель № 4 и 5 относительное увеличение радиуса наибольшее, и, как следствие, возросший над первоначальными тепловой поток.

Описанное выше увеличение ускорения и его осцилляции в дальнейшем приводят к соответствующим осцилляциям скорости w_2 (рис. 3, а). Эти резкие изменения значений ускорения и скорости могут также служить причиной гидродинамической неустойчивости соседних капель. Но, в данном случае, как показал расчет, величины данных сил, вызванных ускорением g и скоростью w , недостаточны для дробления близлежащих капель. Осцилляции ускорения и скорости носят затухающий ха-

рактар и, как видно, из рис. 2, 3 с увеличением времени при дальнейшем слиянии капель амплитудные значения данных параметров уменьшаются, что является следствием, как увеличения размера образующейся капли, так и снижением общего давления в системе по рис. 3, б. Соответствующее резкое увеличение скорости w_2 приводит к снижению значений p_n и наоборот. Тепловой поток изменяется обратно пропорционально температуре пара.

Выводы

Данная модель слияния капель эмульсии позволяет получить общую картину изменения параметров капель эмульсии и, совместно с моделями дробления и перемещения, описать процессы, происходящие при закипании водной фазы эмульсии. Допущение о малости сил электростатического отталкивания и Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения, а также их исключения из рассмотрения на последних стадиях перемещения капель до момента их встречи, является вполне оправданным из-за их полной неопределенности для капель разного размера. Конечно, сделанное предположение о том, что капли мгновенно сливаются, приводит к несколько неверным результатам, но вопрос о времени слияния двух капель разного размера также остается открытым. Время слияния двух капель разного размера, рассчитанное по среднему радиусу и методике [6], равно $\Delta\tau \approx 10^{-7}$ с, что практически совпадает с шагом расчета. Возможен также и другой вариант схе-

мы закипания, при котором капли не сливаются, а растут, взаимодействуя друг с другом, в том случае, если стабилизирующий эффект от ПАВ достаточно велик. Но также может существовать и комбинация данных схем. В целом же любая схема рассмотрения приведет к тепловому равновесию, как если рассматривать слияние, так и если изучать тепловой контакт. Поэтому данная методика расчета закипания эмульсий является вполне приемлемой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эмульсии* / Под ред. Ф. Шермана – Л.: Химия, 1972. – 312 с.
2. *Солодов А.П.* Гравитационные пузырьковые течения // Теплоэнергетика. – 2002. – №8. – С. 59-64.
3. *Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И.* Кинетика испарения в процессах гомогенизации // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28. – №6. – С. 14-20.
4. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. – Киев, Наукова думка, 1980. – 316 с.
5. *Павленко А.М., Климов Р.А.* Перемещение капель дисперсной фазы при вскипании эмульсий // Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов. – Днепропетровск: НМетАУ, 2007. – С. 203-210.
6. *Накорчевский А.И., Басок Б.И.* Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках. – Киев, Наукова думка, 2001. – 348 с.

Получено 11.01.2011 г.