

УДК 621.01.216

А.М. Павленко, Р.А. Климов

**ДИНАМИКА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В ЭМУЛЬСИЯХ**

**Введение.** Проводимые исследования [1-7] ставят своей целью определение оптимальных режимов для процессов эмульгирования, диспергирования и гомогенизации смесей двух и более взаимно не растворимых жидкостей. Для этих процессов играют большую роль паровые пузырьки и паровые полости. Были предложены модели, которые описывают рост парового пузырька из микророзыда в объеме жидкости [2], на поверхностях неограниченного размера при кипении в условиях свободной конвекции [3] и на микроповерхностях [4], представлена модель роста парового пузырька, находящегося в ансамбле таких же пузырьков с учетом коллективного их действия на него [5]. В некоторых источниках проведен сравнительный анализ расчетных и опытных данных. В [6] представлены модели нагрева капли эмульсии типа вода-масло и роста паровой фазы в процессе закипания воды. В данной работе проводится сравнительный анализ различных методик расчета, а также сопоставление результатов [6] с экспериментальными и расчетными данными [2-5].

**Постановка задачи.** Рассматривая работы по динамике роста парового пузырька на поверхностях неограниченного размера при кипении в условиях свободной конвекции [3] и при кипении жидкостей на микроповерхностях [4], видно, что рост парового пузырька протекает в несколько этапов, при этом фактически можно зафиксировать киносъемкой только асимптотическую стадию роста и в работе [4] только она и рассматривается. Приведенные формулы для определения радиуса пузырька в любой момент времени имеют ограниченное применение, т.к. не учитывают сил поверхностного натяжения, инерционных сил и др. Сравнивая результаты расчета по модели [3] видно общую согласованность с экспериментальными данными, но, как и выделяют сами авторы этой модели, существует такая область опытных данных, которая не описывается данной моделью. Из представленных графиков сравнения экспериментальных данных и расчетов по модели [4] можно сделать вывод о том, что расчет согласуется с опытом лишь при определенных значениях коэффициентов  $C_i$ , что является основным

ограничивающим фактором применения этой модели, т.к. для каждого конкретного исследования роста парового пузырька необходимо знать определенное значение этих коэффициентов. В целом работы [3,4] показывают доминирующую роль нагрева стенки в начале роста пузырька, но в эмульсиях при отделении какой-либо из фаз пузырьки находятся также и в непрерывной среде. Модель динамики одиночного парового пузырька [2] позволяет производить расчеты роста и схлопывания парового пузырька, находящегося в объеме неподвижной жидкости, а также в потоке с учетом модели деформации, при этом наблюдается удовлетворительное согласование опытных и расчетных данных. При исследовании поведения ансамбля паровых пузырьков [5], применяя ячеечную модель, можно оценить в каждый момент времени среднее давление в межпузырьковом пространстве системы и ее паросодержание, что позволяет получить результаты по эволюции отдельного пузырька в такой системе. Но эта модель не позволяет детализировать гидродинамические и тепломассообменные явления, возникающие на микроуровне в межпузырьковом пространстве. Также остается открытым вопрос о том, что пузырьки пара, находящиеся в объеме жидкости и возле стенок сосуда, в котором эта жидкость находится, могут иметь различные размеры, находиться в разных термических и гидродинамических условиях, а также могут сливаться один с другим, тем самым, влияя на усложнение описания процесса схлопывания или роста пузырьков.

Основными недостатками практически всех рассмотренных исследований и методик есть то, что они не описывают динамику роста пузырька при его появлении, только в [7] приведено некоторое описание этого процесса от начального радиуса пузырька  $R \approx 0$ , а во всех других исследованиях и расчетах рассматривается уже существующий пузырек, который имеет начальный радиус  $R > 0$  мкм и начальные термодинамические параметры. Некоторые работы предполагают использование высоких скоростей схлопывания парового пузырька для процессов дробления жидких включений эмульсий, но моделей использующих совместный процесс роста (схлопывания) пузырька и дробления включений не существует.

**Метод исследования.** В литературных источниках практически отсутствуют работы, в которых при решении указанной задачи учтены процессы снижения поверхностного натяжения при наличии

ПАВ. Особенностью физических свойств эмульсий типа вода-масло-пар (воздух) является наличие адсорбционных слоев ПАВ, вследствие чего поверхностное натяжение на границе раздела фаз вода-масло значительно уменьшается и по уравнению

$$W_k = \frac{16\pi \cdot \sigma^3}{3(p_n - p_{эс})^2} \quad (1)$$

работа образования критического парового ( $W_k$ ) пузырька снижается пропорционально величине поверхностного натяжения  $\sigma^3$ .

Количественная оценка условий вскипания эмульсий, основанная на том положении, что граничные слои на поверхности частиц включений при перегреве жидкости инициируют её вскипание, проведена в [1]. В процессе экспериментальных исследований замечено, что вода в эмульсиях вскипает при небольших перегревах, что не характерно для чистых жидкостей, вскипание которых происходит при перегреве на несколько десятков градусов. Это объясняется тем, что в граничном слое масляных частиц поверхностное натяжение ниже, чем в объеме и для образования паровой фазы достаточно достижения более низких температур. Таким образом, процесс образования новой фазы инициируется внутренним тепловым воздействием на поверхности масляных частиц. Из экспериментов [1] видно, что среднее время вскипания водомасляных эмульсий снижается с повышением концентрации ПАВ и выражается слабая зависимость среднего времени вскипания от диаметра капли. В [6] представлены математические модели нагрева капли эмульсии и роста паровой фазы. Модель расчета роста паровой фазы имеет вид, приведенный на рисунке 1. Математическая постановка включает уравнения теплопроводности для воды и масла в сферических координатах:

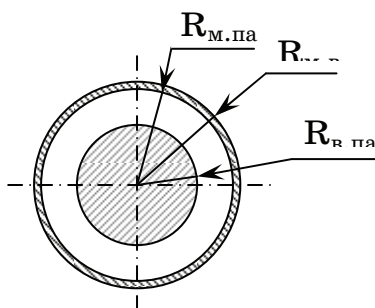


Рисунок 1 – К модели роста парового объема при кипении воды в процессе нагрева воздухом ( $R_{м.воз.}$  – радиус границы раздела масло-воздух;  $R_{м.пар.}$  – радиус границы раздела масло-пар;  $R_{в.пар.}$  – радиус границы раздела вода-пар)

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_B \cdot \left( \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad \tau > 0, \quad 0 < r < R_{в.пар.}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a_M \cdot \left( \frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad \tau > 0, \quad R_{м.пар.} < r < R_{м.воз.}. \quad (3)$$

Начальные условия:

$$t(r, 0) = t_0, \quad 0 < r < R_{м.воз.}. \quad (4)$$

Граничные условия:

$$-\lambda_M \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R_{м.воз.}} = \alpha(R_{м.воз.}, \tau) \cdot (t_{воз.} - t_{м.воз.}), \quad \alpha = Nu \cdot \frac{\lambda_n}{d}, \quad -\lambda_B \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \\ t_{в.п.}(\tau) = t_{кит.в.} = 100^\circ C, \quad t_{м.пар.}(\tau) = t_{кит.в.} = 100^\circ C. \quad (5)$$

Уравнения изменения массы пара и радиусов границ раздела:

$$\Delta M = \frac{\Delta \tau}{L} \cdot \left[ \frac{4\pi \cdot \lambda_M \cdot (t_{м.воз.} - t_{м.пар.})}{\frac{1}{R_{м.пар.}} - \frac{1}{R_{м.воз.}}} - 8\pi \cdot R_{в.пар.} \cdot \lambda_B \cdot (t_{в.пар.} - t_{ц}) \right]; \quad (6)$$

$$R_{в.пар.}^* = \left( R_{в.пар.}^3 - \frac{3\Delta M}{4\pi \cdot \rho_B} \right)^{1/3}; \quad R_{м.пар.}^* = \left( R_{в.пар.}^{*3} + \frac{3\Delta M}{4\pi \cdot \rho_n} \right)^{1/3}; \quad R_{м.воз.}^* = \left( R_{м.пар.}^{*3} + \frac{3V_M}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Критерий окончания расчета (толщина разрыва пленки масла):

$$\delta = R_{м.пов.}^* - R_{м.пар.}^*; \quad \delta \leq 0.5 \text{ мкм}. \quad (8)$$

Скорости движения границ раздела:

$$v_{в.пар.} = dR_{в.пар.}/d\tau; \quad v_{м.пар.} = dR_{м.пар.}/d\tau; \quad v_{м.воз.} = dR_{м.воз.}/d\tau. \quad (9)$$

Результаты расчетов по уравнениям (2–9) и их обсуждение приведены в [6]. Некоторые из них показаны на рисунке 2. Сравним эти результаты с результатами расчетов по моделям [2–5].

В [5] приведены графики изменения радиуса паровых пузырьков и скорости их роста для моодисперсного ансамбля пузырьков и для изолированного пузырька после мгновенного сброса внешнего давления от 59 до 20 кПа в рамках ячеечной модели. Для сравнения выберем изолированный пузырек и его параметры (рисунок 3).

Из рисунков 2 и 3 видно, что форма кривых изменения радиуса и скорости движения границы раздела имеют практически идентичный характер. Главным сходством рисунков 2б и 3б является наличие явно выраженного экстремума в графике изменения скорости, а если сравнивать кривую изменения скорости для  $t_{воз.}=300^\circ C$  [6], то можно сделать вывод о том, что они практически одинаковы.

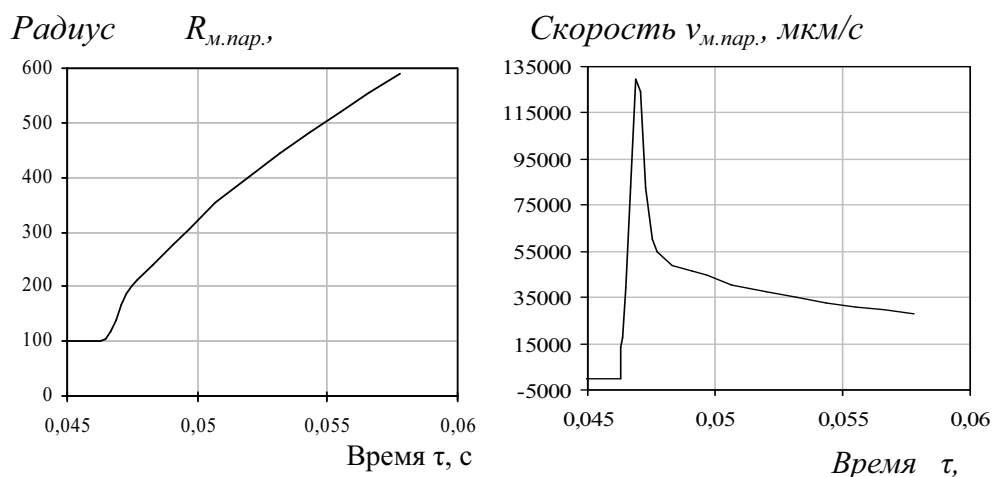
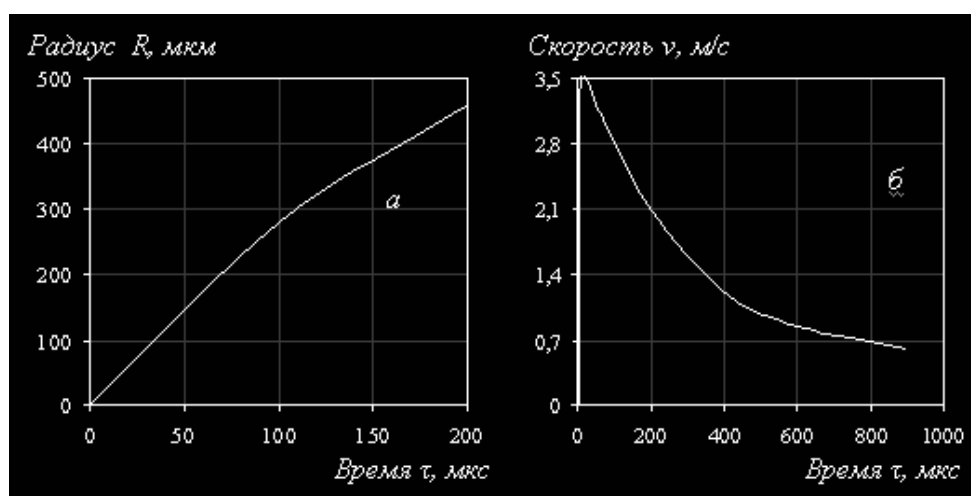
Рисунок 2 – Результаты расчетов по модели [6] для  $t_{\text{воз.}}=500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

Рисунок 3 – Результаты расчетов по модели [5]

Время необходимое для увеличения радиуса на 500 мкм по результатам [5] занимает гораздо меньший промежуток, в результате чего и значения скорости роста пузырьков на рисунке 3б значительно выше, чем на рисунке 2б. Сравнивая результаты экспериментальных данных изменения радиуса парового пузырька [2-5] с рисунком 2а, видно, что характер изменения кривых  $R(\tau)$  практически одинаковый во всех случаях, но конечные значения радиусов по экспериментам всегда больше, чем рассчитанные по [6], на одинаковом промежутке времени. Этот факт можно объяснить тем, что по модели [6] все количество теплоты воспринимает пленка масла и только потом от пленки она передается воде с паром, т.е. пленка играет роль термического сопротивления, как в процессе нагрева, так и в процессе кипения. При этом прямой участок на рисунках 2а и 2б указывает на процесс нагрева капли эмульсии до момента закипания воды. Модель представленная в [6] позволяет рассчитывать температурное поле по

сечению капли воды и пленки масла, как в процессе нагрева, так и в процессе роста паровой фазы, что не было предусмотрено во всех рассмотренных выше моделях и экспериментальных данных.

**Выводы.** В работе приведен сравнительный анализ различных подходов и методик расчета роста парового пузырька, показана отличительная особенность вскипания воды в эмульсиях типа вода-масло. Методы [2,5,7] позволяют только описать рост пузырька и разрыв пленки, в то время, как метод [6] предусматривает нахождение температурных полей по сечению капли эмульсии и временной промежутков до начала закипания воды, совместно с описанием роста паровой фазы до разрыва масляной пленки. Разрыв пленки масла учитывается минимальной ее толщиной при которой она разрушается. Формирование паровой фазы представлено количественно и экспериментально в [1]. Таким образом, модель [6] позволяет описать нагрев капли эмульсии до момента закипания воды, формирование паровой фазы, а также ее рост, совместно, что не могут сделать другие методы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И. Теплофизические процессы в эмульсиях. - Киев, Наукова думка, 2005. – 265с.
2. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа ДИВЭ. 1. Модель динамики одиночного парового пузырька. / Пром. теплотехника. – 1995. – Т.17. –№5. – С.3 – 29.
3. Басок Б.І., Зав’ялов В.Л., Кулінченко В.Р. Динаміка росту парової фази при кипінні рідин в умовах вільної конвекції. / Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25. – №6. – С.34 – 41.
4. Кравец В.Ю., Щербаков В.К. Скорость роста паровых пузырей при кипении жидкостей на микроповерхностях. / Пром. теплотехника. – 2000. – Т.22. –№2. – С.5 – 7.
5. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа ДИВЭ. 2. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков. / Пром. теплотехника. – 1996. – Т.18. –№1. – С.3 – 20.
6. Павленко А.М., Клімов Р.О., Басок Б.І. Розвиток методів гідротермічної гомогенізації./ Пром. теплотехника. – 2005. – Т. 27. – №4. – С.64 – 71.
7. Долинский А.А., Басок Б.И. Дискретно – импульсная трансформация энергии в адиабатно вскипающем потоке. / Пром. теплотехника. – 2001. – Т.23. –№4-5. – С.5 – 20.

Получено \_\_.\_\_.2006 г.