

Моделирование процесса образования парового сегмента в процессе кипения

А.Е. Нурпейис.

Национальный исследовательский Томский Политехнический

Университет ЭНИН, ТПТ, 6М502

E-mail: Nurpeiis_Atlant@mail.ru

Введение

Жидкости с пузырьками газа или пара используются в ряде отраслей современной промышленности, таких как теплоэнергетика, химические и криогенные технологии, нефтяное и газовое хозяйства. Исследование динамики роста паровых пузырьков и их теплообмена с жидкостью актуально в связи с необходимостью совершенствования технологических процессов, а также управления промышленными установками. Теоретическое исследование процессов теплообмена в настоящее время базируется на численном моделировании с использованием ЭВМ. В настоящее время численное моделирование процессов теплообмена приобретает все более значительную роль. Это связано с тем, что для современной науки и техники необходим достоверный прогноз таких процессов, экспериментальное изучение которых очень сложно или невозможно.

Целью данного исследования является математическое моделирование роста парового пузырька, окруженного по внешнему контуру водой. Основной задачей исследования является численное моделирование нестационарного двумерного теплопереноса в системе «паровой пузырек – вода».

Общая физическая постановка

Рассматривается двумерная нестационарная нелинейная задача теплопроводности. Анализируется теплопередача через паровой пузырек, окруженный слоем жидкости с учетом реальной геометрии системы «паровой пузырек – вода» и неоднородных граничных условий (рис.1).

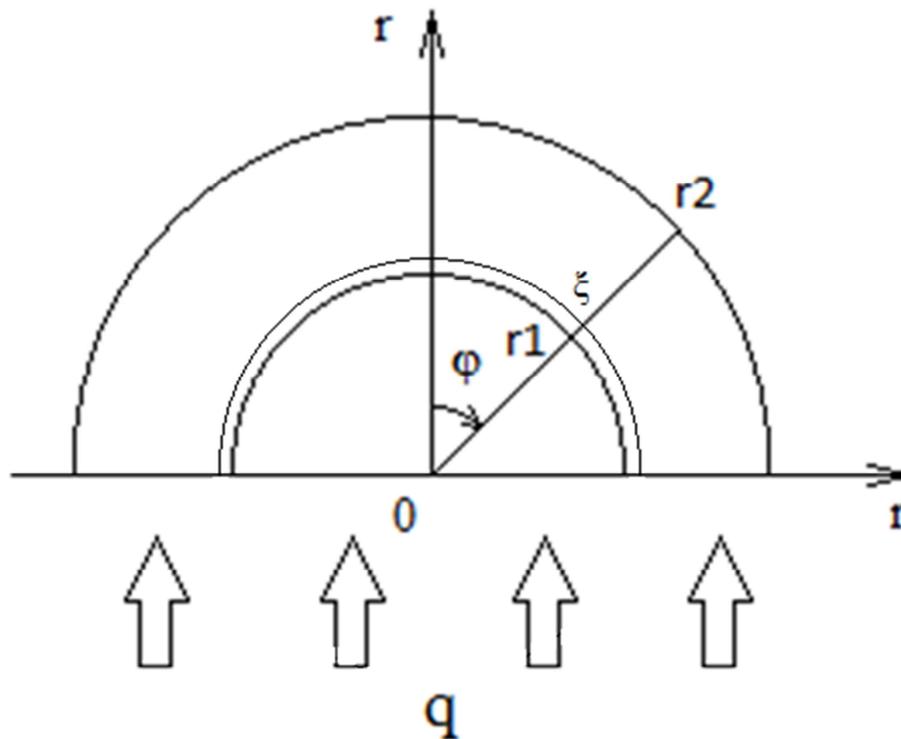


Рис.1. Схема поперечного сечения полусферы системы «пар-вода».

В основу модели рассматриваемой системы положены следующие исходные данные и предпосылки. Область решения задачи представляет собой пузырек пара, окруженный по внешнему контуру водой, который растет за счет подвода тепла к металлической поверхности и испарения воды на границе раздела фаз. В качестве начального условия принимается, что зародыш парового пузырька уже образован в воде с начальным размером $d_n=1 \cdot 10^{-6}$ м [4]. Из уравнения состояния определяется давление парового пузырька. Задача решалась в полярной системе координат, начало которой связано с осью симметрии исследуемого процесса. Ось $0r$ является осью

симметрии, поэтому можно рассматривать процесс в осимметричной постановке.

При постановке задачи приняты следующие допущения: теплофизические характеристики являются постоянными и известными величинами [1], это объясняется тем, что в рассматриваемом диапазоне изменения основных определяющих параметров, теплофизические характеристики веществ изменяются незначительно[1], и этим можно обоснованно пренебречь; сила поверхностного натяжения между паровым пузырьком и водой не учитывается, в виду того что в критической точке, пар и жидкость неразличимы и поэтому граница раздела исчезает [2].

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы системы «паровой пузырек - вода».

Математическая постановка задачи

В рассмотренной выше постановке, задача сводится к решению системы уравнений, описывающих теплоперенос в паровом пузырьке окруженного по внешнему контуру водой в полярной системе координат. Система уравнений включает двумерные нестационарные уравнения теплопроводности (1, 2) для пара и воды.

$$c_1 \rho_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_1}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} \quad \begin{matrix} 0 < r < r_1 \\ 0 < \varphi < \pi \end{matrix} \quad (1)$$

$$c_2 \rho_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + \frac{\lambda_2}{r^2 \sin^2 \varphi} \frac{\partial^2 T_2}{\partial \varphi^2} \quad \begin{matrix} r_1 < r < r_2 \\ 0 < \varphi < \pi \end{matrix} \quad (2)$$

$$r = 0 \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = q \quad (3)$$

$$r = r_1, \quad 0 \leq \varphi \leq \pi \quad -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} - Q \cdot W, \quad T_1 = T_2 \quad (4)$$

$$r = r_2, 0 \leq \varphi \leq \pi \quad \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

$$\varphi = 0, 0 \leq r \leq r_1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} = 0 \quad (6)$$

$$\varphi = 0, r_1 \leq r \leq r_2 \quad \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} = 0 \quad (7)$$

$$\varphi = \pi, 0 \leq r \leq r_1 \quad \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} = 0 \quad (8)$$

$$\varphi = \pi, r_1 \leq r \leq r_2 \quad \frac{\partial T_2}{\partial \varphi} = 0 \quad (9)$$

где c – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; r – радиальная координата, м; φ – угловая координата, град; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; t – время, с; Q – теплота фазового перехода, Дж/кг; q – удельная плотность теплового потока, Вт/м²; W – массовая скорость, кг/(м²·с); Индексы: 1 – паровая фаза, 2 – вода.

Массовая скорость испарения рассчитывалась по формуле [1]:

$$W = \frac{A(P'' - P)}{\sqrt{\frac{2\pi R_0 T_{с.ф.}}{M}}} \quad (10)$$

$$P'' = P_0 \exp\left(-\frac{Q_{исп}}{RT}\right) \quad (11)$$

где A – коэффициент аккомодации; P_0 – предэкспоненциальный множитель.

Координата подвижной границы испарения ξ определялась из совместного решения систем уравнений (3 - 9) по формуле

$$\xi = r_1 + \int_0^t v d\tau \quad (10)$$

$$v = \frac{W}{\rho_e} \quad (11)$$

где v - скорость продвижения фронта испарения, м/с; ρ_e - плотность воды, кг/м³; t – время, с.

Метод решения и исходные данные

Дифференциальные уравнения в частных производных (1 - 2) представляли в виде разностных двумерных уравнений [3]. Задача решалась методом конечных разностей на равномерной сетке. Для этого разбивали область решения на $N-1$ равных промежутков по каждой координате по радиусу и по углу, т.е. строили конечно-разностную сетку [3].

Теплофизические характеристики пара и воды [4,5]: теплопроводность, плотность и теплоемкость $\lambda_{п}=0,0251$ Вт/м·К, $\rho_{п}=958,1$ кг/м³, $C_{п}=2038$ Дж/кг·К, $\lambda_{в}=0,642$ Вт/м·К, $\rho_{в}=998,1$ кг/м³, $C_{в}=4181$ Дж/кг·К;

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 приведены результаты численного моделирования, полученные программным комплексом, разработанным в среде Turbo Pascal, в виде распределения температуры $T(r)$ при различных тепловых потоках подводимых к нагреваемой поверхности $q_1=5000$ Вт/м², $q_2=7500$ Вт/м², $q_3=10000$ Вт/м² в момент времени $\tau=0,001$ секунд. Видно, что с течением времени распределение температуры по радиусу парового пузырька и воды становятся более равномерным.

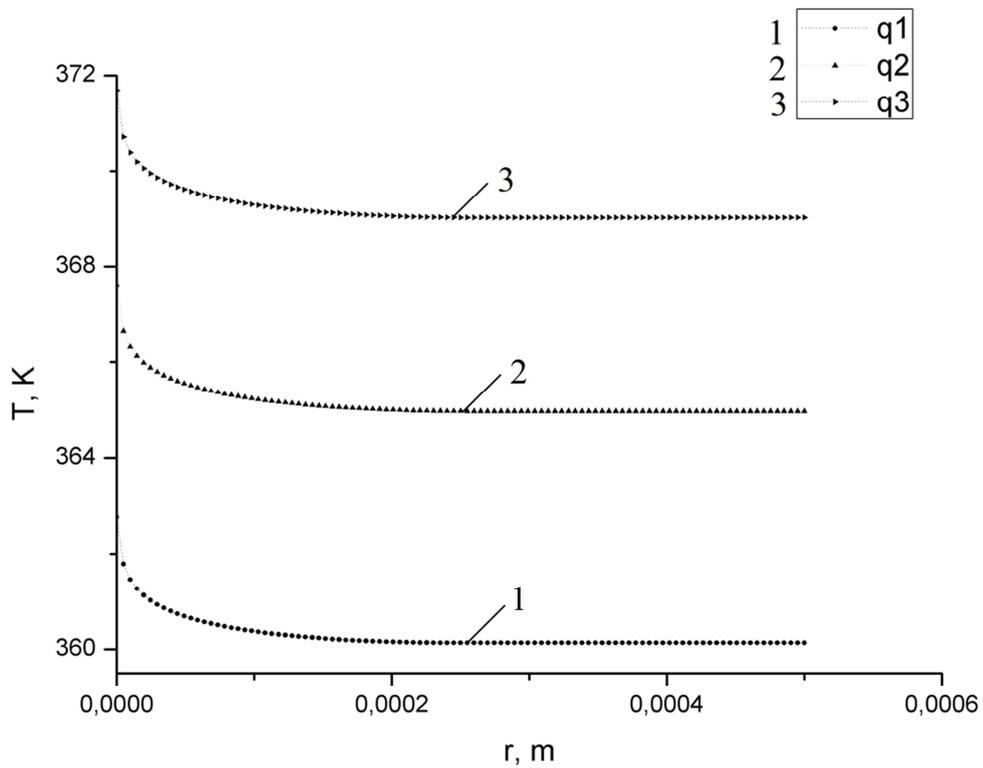


Рис. 2. Распределение температуры по радиусу при тепловых потоках $q_1=5000 \text{ Вт/м}^2$, $q_2=7500 \text{ Вт/м}^2$, $q_3=10000 \text{ Вт/м}^2$ в момент времени $\tau=0,001$ секунд.

На рисунках 3 – 4 представлены координаты положения границы раздела фаз при тепловых потоках $q_1=5000 \text{ Вт/м}^2$, $q_2=7500 \text{ Вт/м}^2$, $q_3=10000 \text{ Вт/м}^2$ в момент времени $\tau=0,001$ секунд. Координата подвижной границы испарения ξ определяется по формуле 10.

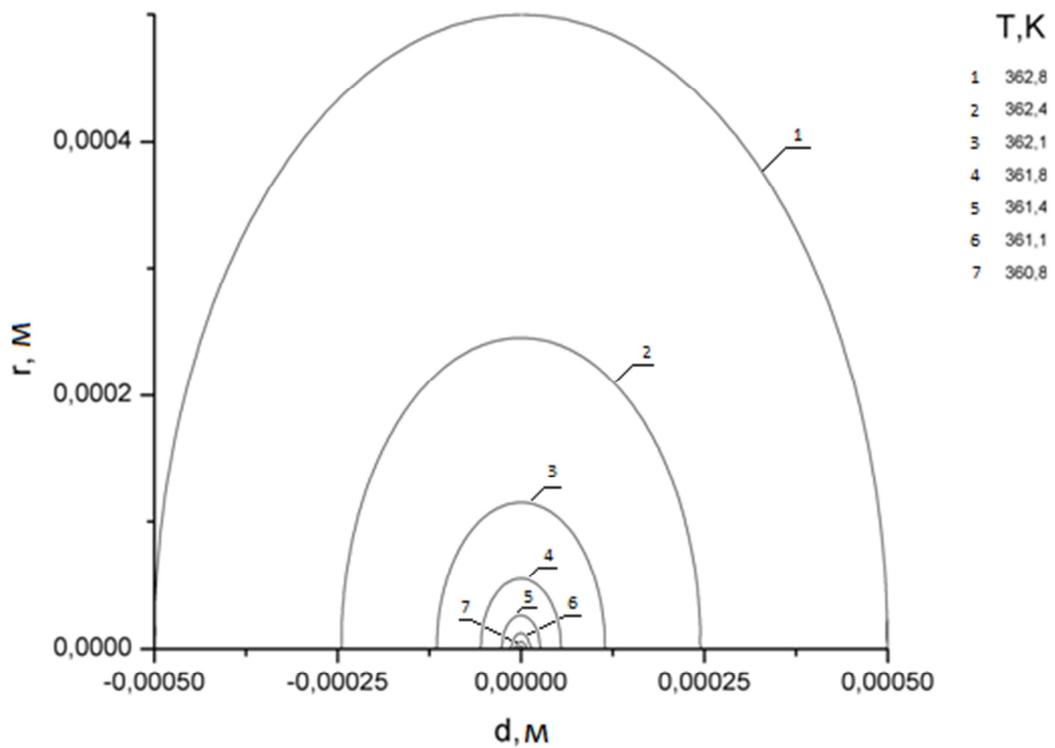


Рис. 3. Координаты положения границы раздела фаз при подводе теплового потока $q_1=5000 \text{ Вт/м}^2$ в момент времени $\tau=0,001$ секунд.

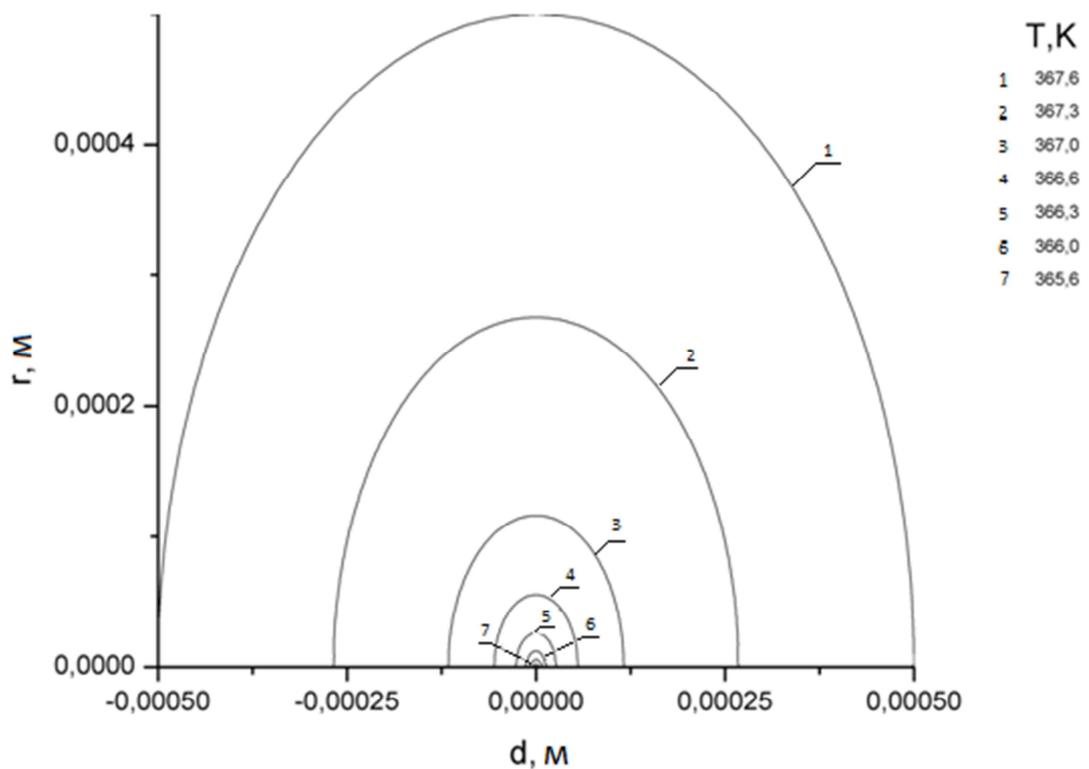


Рис. 4. Координаты положения границы раздела фаз при подводе теплового потока $q_2=7500 \text{ Вт/м}^2$ в момент времени $\tau=0,001$ секунд.

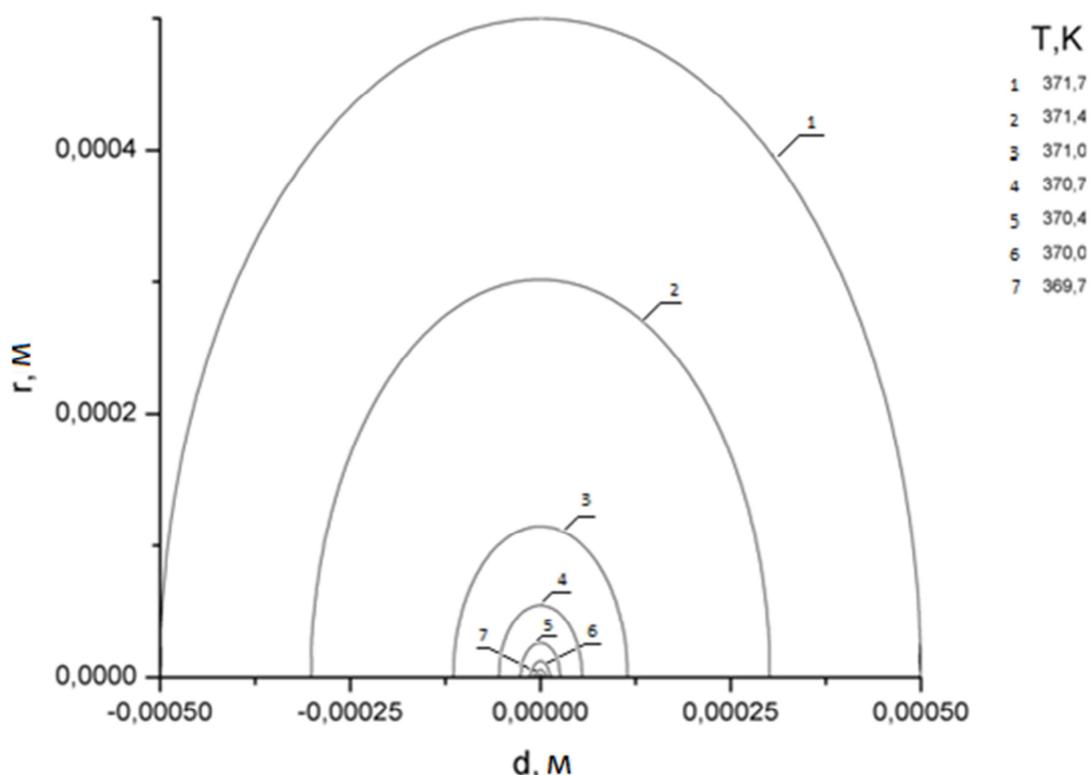


Рис. 5. Координаты положения границы раздела фаз при подводе теплового потока $q_3=10000 \text{ Вт/м}^2$ в момент времени $\tau=0,001$ секунд.

Из рис. 3 – 5 следует, что при увеличении подвода тепловой энергии и эффекта испарения на границе раздела «пар - вода», радиус парового пузырька окруженного слоем воды увеличивается.

Заключение

Предложен новый подход к моделированию процесса роста парового пузырька, окруженного по внешнему контуру водой. Разработана математическая модель процесса образования парового сегмента в процессе кипения. Впервые решена двумерная нелинейная нестационарная задача теплопроводности в полярной системе координат для пузырька пара, окруженного слоем воды при подводе теплоты к металлической поверхности и эффекта испарения на границе раздела фаз. Полученные при выполнении работы результаты создают объективные предпосылки перспективности применения разработанного подхода к анализу механизма роста паровых пузырьков на поверхности нагрева.

Список литературы

1. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Издательство МЭИ, 2000. – 388 с., ил.
2. Механика двухфазных систем: учебное пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 384 с.: ил.
3. Самарский А.А., Вабищев П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едитореал УРСС, 2003. – 782 с.
4. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства веществ. М.: Госэнергоиздат, 1956.
5. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.