

Равновесные параметры капли с заряженным ядром конденсации во внешнем электрическом поле

М.С. Кшевецкий, А.К. Щекин

Исследованы равновесные параметры диэлектрической капли с заряженным ядром конденсации во внешнем однородном электрическом поле, обобщающие ранее полученные результаты в [1,2]. Рассмотрены два характерных случая: первый, когда капля с заряженным ядром подвешена внешним однородным электрическим полем в поле силы тяжести; и второй, когда капля равномерно движется под воздействием внешнего электрического поля при учете сопротивления окружающей паро-газовой среды. Учтено, что под воздействием внешнего электрического поля и поля реакции внутри капли заряженное ядро конденсации может смещаться из центра масс капли в новое положение равновесия внутри капли. Сформулирована и реализована схема численного решения нелинейной системы дифференциальных уравнений для равновесного профиля капли и электрических потенциалов внутри капли и в паро-газовой среде при произвольных значениях размера капли, напряженности внешнего поля и заряда ядра конденсации. Построены зависимости равновесного профиля и таких термодинамических характеристик капли, как химический потенциал конденсата и работа образования капли от размера капли, массы и заряда ядра конденсации, напряженности внешнего поля и отношения диэлектрических проницаемостей капли и паро-газовой среды. Результаты численных расчетов дополняются аналитическим исследованием решения задачи в первых порядках теории возмущений при слабом внешнем поле.

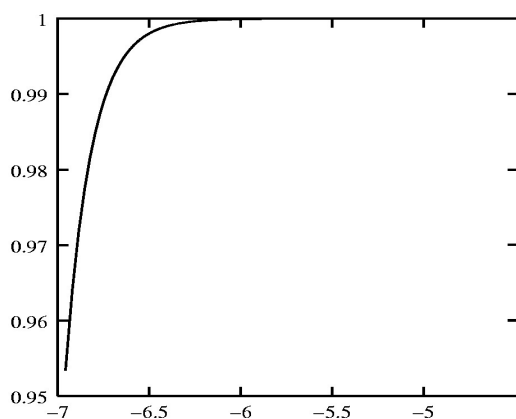


Рис. 1. Зависимость от размера капли отношения химического потенциала молекулы в капле воды к капиллярному вкладу в химический потенциал. По нижней оси отложен десятичный логарифм размера капли, взятого в см.

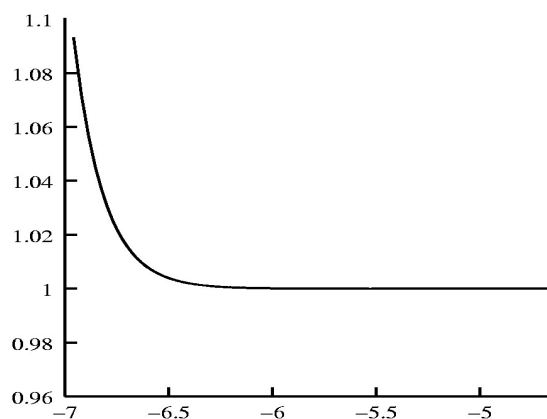


Рис. 2. Зависимость от размера капли отношения работы образования капли воды к работе образования поверхности капли. По нижней оси отложен десятичный логарифм размера капли, взятого в см.

Для случая подвешенной капли с высокой диэлектрической проницаемостью показано, что профиль малых и средних капель практически не отличается от сферы. Это объясняется тем, что влияние внешнего поля на состояние таких капель незначительно. Влияние заряда ядра конденсации проявляется только для малых капель и сильно убывает при росте размера капли, как это показано на рис. 1 и 2. При этом следует иметь в виду, что на рис. 1 и 2, также как ниже и на рис. 3 и 4, каждому размеру капли соответствуют различные напряженности внешнего электрического поля. Связь между ними определяется условием равновесия капли $qE = (4/3)\pi\rho^\alpha(1 + \tilde{m})R^3$, где q – заряд ядра конденсации, E – напряженность внешнего электрического поля, ρ^α – плотность жидкости, R – радиус эквивалентной

сферы, определяемый из объема капли V соотношением $V = 4\pi R^3/3$, $\tilde{m} = m_n/m_l$ – отношение массы ядра конденсации m_n к массе жидкости $m_l = \rho^\alpha V$.

В зависимости от массы ядра конденсации и размера капли, положительно заряженное ядро конденсации будет смещаться в направлении или против направления электрического поля, чему на рис. 3 соответствуют положительная и отрицательная часть кривой. Это смещение будет определяться в соответствии с формулой

$$\tilde{h} = \frac{\varepsilon^\alpha ER^2}{2q} \frac{(3 - \tilde{m}(\varepsilon - 1))}{(\varepsilon - 1)(1 + \tilde{m})^2} + O(E^3),$$

где $\tilde{h} = h/R$, h – смещение ядра конденсации относительно центра масс капли, $\varepsilon = \varepsilon^\alpha/\varepsilon^\beta$ – отношение диэлектрических проницаемостей жидкости ε^α и пара ε^β . Как показано на рис. 4, для достаточно больших капель ядро может вплотную подходить к границе капли. Из рисунка видно, что кривая 3 практически ложится на кривую 2, а пересечение кривой 1 и 2, которое могло бы означать возможный вылет ядра конденсации из капли, на самом деле является следствием недостаточной точности проведения вычислений вблизи границы капли.

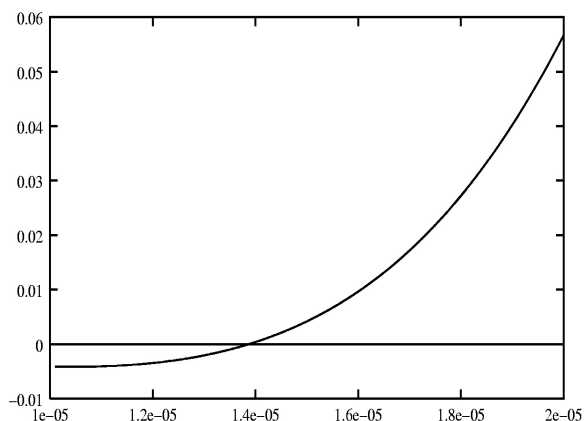


Рис. 3. Относительное смещение \tilde{h} ядра конденсации водяной капли, в зависимости от ее размера. Масса ядра конденсации $m_n = 4.2 \cdot 10^{-16}$ г. По нижней оси отложен размер капли в сантиметрах.

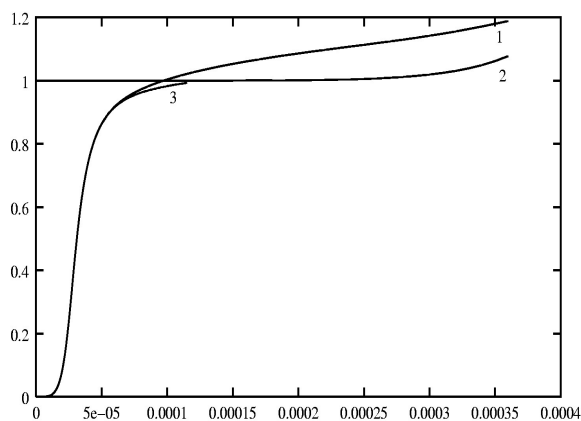


Рис. 4. На рисунке: кривая 1 – относительное смещение \tilde{h} ядра конденсации, кривая 2 – положение границы капли по отношению к центру масс капли, кривая 3 – то же, что и кривая 1, но при удвоенной точности вычислений. По нижней оси отложен размер капли в сантиметрах.

В случае равномерно движущейся капли показано, что результаты не зависят от массы ядра конденсации, а смещение ядра конденсации всегда будет происходить в одном направлении (в направлении поля, если заряд ядра положительный). Для достаточно сильных электрических полей это смещение сравнимо с размером капли и в некоторых случаях будет вызывать достаточно сильную деформацию профиля капли.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобразования России Е00-3.2-116.

Литература

1. Shchekin A.K., Kshevetskiy M.S., Warshavsky V.B. The Electric Field Effects on the Profile and Thermodynamics of a Dielectric Droplet: Numerical and Analytical Results // to be published in Aerosol Science and Technology, 2001.
2. Варшавский В.Б., Щекин А.К. Термодинамика диэлектрической капли с заряженным ядром во внешнем электрическом поле // Коллоид. журн. 1999. Т.61. №5. С.624.

НИИ физики СПбГУ им. В.А. Фока