

# К вопросу математического моделирования электрокинетических явлений в облачной среде

Кумыков Т.С.

Научно-исследовательский институт прикладной математики и автоматизации  
Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук, Россия

macist20@mail.ru

Многочисленные исследования электрических явлений в атмосфере показывают, что возникновение грозового электричества связано с кристаллизацией воды в атмосфере [1-2]. При этом фундаментальную роль имеет эффект возникновения аномально больших разностей потенциалов (до сотен вольт) на границе раздела фаз вода-лед при замерзании воды. Этот эффект до настоящего времени не получил убедительного объяснения. Возникновение этого эффекта связывается с переносом заряженных пузырьков из жидкой фазы в лед при замерзании воды. При этом остается открытым вопрос о том, заряжаются ли пузырьки воздуха в воде, если да, то чему равны заряды этих пузырьков, как определить знак этих зарядов.

Как известно, лишний потенциал может возникнуть в дисперсных системах при условии резко выраженного различия полярных свойств среды и дисперсной фазы. Например, в случае облаков дисперсионной фазой является воздух, а дисперсной фазой – водяные капли или кристаллы льда, т. е. облако представляет собой аэрозольную среду. Ориентация молекул воды на поверхности капли по оценке А.Н.Фрумкина обуславливает электрический потенциал около 0,25 В [2]. Химическое сродство капель воды к ионам, находящимся в воздухе, и наличие потенциала на межфазной границе приводят к тому, что капли воды не одинаково адсорбируют противоположно заряженные ионы, и их средний заряд в системе отличен от нуля. Принимая во внимание, что заряд  $q$  и потенциал  $\varphi$  для сферической частицы связаны соотношением [3]

$$q = \varphi r, \quad (1)$$

обнаруживается, что заряды капель пропорциональны радиусу.

Аналогичную ситуацию мы имеем в случае пузырьков в воде и в водных растворах - роль капель в воздухе играют пузырьки газа в воде. Пузырьки газа также заряжаются, их заряд определяется формулой (1). Однако имеется существенное различие между системами воздух-капельки воды и вода-пузырьки газа. При движении капель в воздухе ионы прочно сосредоточены на поверхности капли, а диффузионный слой вокруг капель имеет сравнительно малую толщину. Плоскость скольжения, проходящая по диффузному слою, находится на достаточно большом расстоянии от вязкого подслоя, в котором в основном сосредоточены заряды. Практически весь диффузный слой увлекается вместе с каплей.

В случае движения пузырьков в воде диффузный слой простирается на большее расстояние от поверхности пузырька. Плоскость скольжения проходит через диффузионный слой. Таким образом, в движении участвует лишь часть зарядов, окружающих пузырек. Эффективный потенциал  $\xi$  несколько меньше, чем  $\varphi$ . Однако это различие, по-видимому, не играет существенной роли. Ослабления возникают также из-за того, что пузырьки все время растут, следовательно, меняются их заряды. Поэтому речь может идти об оценке электрического поля, возникающего в воде вдоль перемещения пузырьков, и, наоборот, об оценке зарядов пузырьков по известной величине напряженности поля. Эта напряженность все время меняется, уменьшается с течением времени (вследствие уменьшения интенсивности выделения пузырьков и уменьшения их дисперсности).

Экспериментально движение пузырьков изучалось многими исследователями в различных средах и при разных значениях диаметра пузырьков [4]. Но эти методы имеют ряд недостатков: главные из них – это возникновение электродных процессов, которые существенно могут повлиять на напряженность электрического поля  $E$ ; визуально можно наблюдать движение лишь достаточно крупных пузырьков размером порядка 0,1 мм и больше, тогда как в переносе зарядов принимают участие и мелкие пузырьки, концентрации которых значительно больше, чем концентрации крупных пузырьков. При таких условиях практически невозможно достаточно точно оценить заряды отдельных пузырьков.

В силу указанных недостатков нами был предложен и рассмотрен другой метод определения заряда пузырьков, основанный на эффекте Холла (методика измерения заряда пузырьков путем измерения отклонения всплывающих в воде пузырьков от вертикальной оси в поперечном магнитном поле).

Рассматривая потенциал всплывания как электрокинетическое явление, представим себе, что пузырьки, несущие заряд, поднимаются под действием силы Архимеда. В процессе всплывания ионы диффузного слоя в силу молекулярного трения отстают от движущегося пузырька, т. е. осуществляется поток заряженных пузырьков.

Как известно, при движении заряженной частицы в магнитном поле на частицу действует сила Лоренца, определяемая формулой:

$$\vec{F}_L = q [\vec{V} \cdot \vec{B}], \quad (2)$$

где  $\vec{V}$  – скорость подъема частиц (пузырька),  $\vec{B}$  – внешняя магнитная индукция,  $q$  – заряд. На рис 1. показаны направления магнитной индукции  $\vec{B}$  и скорости пузырька.

В выбранной нами системе координат имеем:  $\vec{B}(0, B, 0)$ ,  $\vec{V}(V_x, 0, V_z)$ , и выражение (2) расписывается в виде:

$$\vec{F}_L = q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ V_x & 0 & V_z \\ 0 & B & 0 \end{vmatrix}.$$

Отсюда получаем:

$$\vec{F}_L = Bq(-V_z\vec{i} + V_x\vec{k}). \quad (3)$$

Известно, что уравнение движения пузырька имеет вид

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_{\text{арх}} + \vec{F}_L + \vec{F}_{st} + \vec{F}_t \quad . \quad (4)$$

Здесь  $\vec{F}_{\text{арх}} = \frac{4}{3}\pi\rho_{\text{вод}}\vec{g}$  – архимедова сила, направленная вверх,  $\vec{F}_{st} = 6\pi\eta\vec{V}$  – стоксовая сила сопротивления,  $m$  – масса воды в объеме, равном объему пузырька.

Как показывают наблюдения за подъемом пузырьков в воде, скорости движения пузырьков мало меняются. В таблице приводятся скорости подъема пузырьков и их отклонения от вертикальной оси.

где  $D = 0,28$  см (размер пузырька),  $L$  – горизонтальное отклонение траектории пузырьков,  $t$  – время,  $h$  – высота подъема пузырьков,  $V_x, V_z$  – составляющие скорости пузырька.

Проектируя уравнение (4) на оси координат и отбросив инерционные члены, получаем:

$$-6\pi\eta r V_x + BqV_z = 0.$$

Откуда для пузырьков с  $r \leq 10^{-5}$ м:

$$q = \frac{6\pi r\eta V_x}{B V_z}, \quad (5)$$

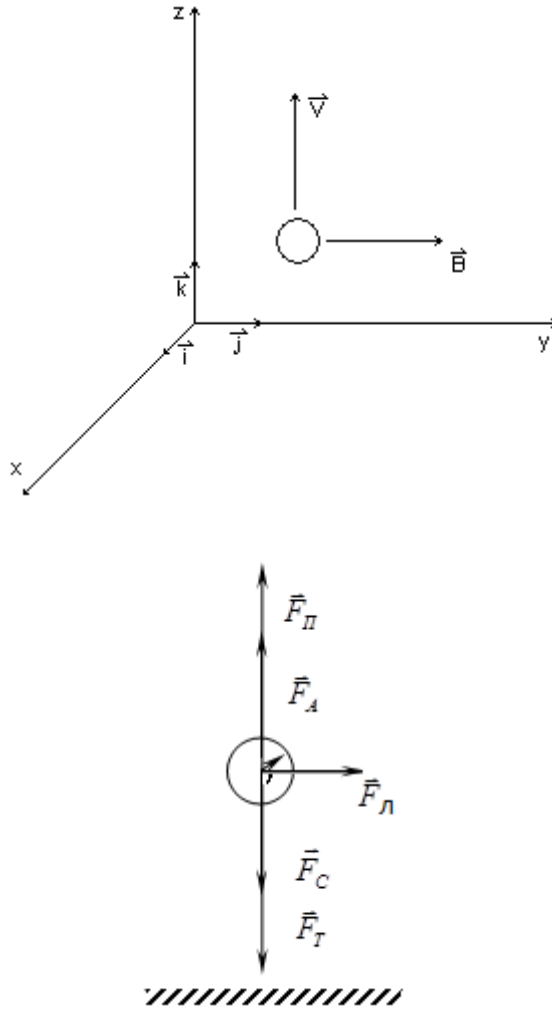


Рис. 1. Направления магнитной индукции  $\vec{B}$ , скорости пузырька и сил действующих на пузырек в магнитном поле

Таблица 1. Отклонение пузырьков в магнитном поле при  $B = 3000$  гаусс

L, мм	t, с	$V_x$ , мм/с	h, см	$V_z$ , мм/с
3,2	15	0,2	8	0,53
3,8	15	0,25	-	0,53
1,8	14	0,12	-	0,57
1,5	14	0,23	-	0,57
1,4	15	0,16	-	0,53
2,8	15	0,186	-	0,53
3,4	15	0,226	-	0,53
2,4	16	0,15	-	0,5
1,8	15	0,12	-	0,53
2,5	15	0,16	-	0,53

а для пузырьков, размеры которых лежат в интервале от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  м–

$$q = \frac{12\pi r^2 \eta V_x}{B V_z} . \quad (6)$$

В формулах (5) и (6) величины  $V_x$  и  $V_z$  легко определяются из эксперимента (см. Таблицу), а  $\alpha$  - угол наклона траектории пузырька к оси  $Z$  определяется из соотношения  $\frac{V_x}{V_z} = tg\alpha$ . Если пузырек движется от нас, то заряд  $q$  – положительный (при условии, что магнитное поле направлено слева направо). Если же он движется к нам, то  $q$  – отрицательный. В нашем случае пузырек двигался от нас, значит  $q$  – положительный.

Из формул (5) и (6) вытекает существенный вывод: поскольку заряд пузырька  $q = \varphi r$ , то отношение  $\frac{V_x}{V_z}$  не зависит от радиуса пузырьков, для которых  $r \leq 10^{-4}$  м. Этот факт подтверждается также экспериментально – маленькие пузырьки разных размеров, всплывающие в воде, отклоняются в магнитном поле почти на один и тот же угол.

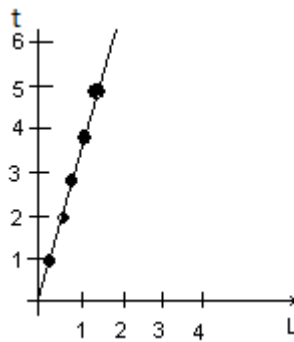


Рис. 2. Изменение траектории пузырька в магнитном поле со временем.

На рис.2 приводится изменение отношения  $\frac{V_x}{V_z}$  в зависимости от времени. Из рисунка видно, что угол наклона траектории пузырька к вертикали со временем не меняется.

В случае, когда размер пузырька превышает  $10^{-4}$  м, сила сопротивления пропорционально квадрату радиуса пузырька, и установившееся движение пузырька описывается уравнением

$$\frac{\pi \rho \zeta r^2 V}{2} V_x = q B V_z , \quad (7)$$

где  $\zeta$  - безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления.

Из равенства (7) следует, что с увеличением размера пузырька угол отклонения траектории от вертикальной прямой уменьшается. Кроме того, с учетом равенства (1), можем записать

$$\varphi = \frac{\pi \rho \zeta r V V_x}{2 B V_z} .$$

Принимая во внимание, что установившаяся скорость всплывания видимых на глаз пузырьков ( $r=10^{-4}$  м),  $V = \left(\frac{8}{3}gr\right)^{1/2} = 5,1\sqrt{r}$  см/с, получаем:

$$\varphi = \frac{2,5\pi \rho \zeta r^{3/2} V_x}{B V_z} . \quad (8)$$

Формула (8) позволяет по известным значениям  $r$ ,  $B$ ,  $V_x$  и  $V_z$  определять электрокинетический потенциал на поверхности пузырька.

Из таблицы следует, что при  $r \approx 0,1$  см,  $B = 3 \cdot 10^3$  гаусс, отношение  $\frac{V_x}{V_z} = 0,4$ . При этом по формуле (1) получим:  $\varphi = 0,13$  В, что находится в хорошем согласии со значениями 0,25 В. Если иметь в виду, что электрокинетический потенциал  $\phi$  всегда меньше, чем скачок

потенциала на границе раздела вода – воздух, то с газовыми пузырьками увлекаются лишь ионы, непосредственно прилипшие к поверхности раздела фаз, а часть диффузного слоя ионов остается в воде.

Таким образом, в данной работе показано, что пузырьки газа являются заряженными, их заряд пропорционален произведению радиуса пузырька и скачку потенциала на границе раздела вода – воздух. Проведен теоретический расчет по определению заряда пузырька при его всплывании в жидкости, находящейся во внешнем магнитном поле. Разработан новый метод по определению величины заряда пузырька и его знака на основе эффекта Холла. Установлено, что теоретические расчеты заряда пузырьков находятся в хорошем согласии с данными, полученными экспериментально.

## Литература

1. *Фролов Ю.Г.* Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы. М. “Химия”, 1989. 464 с.
2. *Френкель Я.И.* Собрание избранных трудов. М.-Л.,: Наука, 1958. 540 с.
3. *Жекамухов М.К., Камбиев М.М.* Об одном возможном механизме возникновения больших потенциалов при кристаллизации водных растворов // ЖТФ, 1984. 2884 с.
4. *Кумыков Т.С.* Дисперсные системы с пузырьками газа и их роль в генерации грозового электричества / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нальчик, 2009. 124 с.

## To the question of mathematical modeling of electrokinetic phenomena in cloudy environment

*Kumukov T.S.*

*Institution of Russian Academy of Sciences Kabardin-Balkar Scientific Centre of RAS, Russia*

The paper presents the effect of potential difference initiation at the boundary of water-ice phase during water freezing which is associated with charged bubble transfer from a liquid phase to ice during water freezing. It has been shown that gas bubbles are charged and their charge is proportional to a bubble radius and potential jump at the boundary of water and air. Theoretical calculations have been carried out to determine bubble charge during its surfacing in a liquid in outer magnetic field. A new method has been developed to determine bubble charge value and its sign via Hall effect. It has been established that theoretical calculations of bubble charge well agree with the data obtained experimentally.