

УДК 551.575.36 (421)

***М. Н. Чесноков\**, *И. Н. Казакова\**, *Т. В. Грызунова\**,  
*И. С. Андрианова\*\****

*\*Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова*

*\*\* Одесский государственный экологический университет*

### **Испарение капель водных растворов натрий – хлор в электрическом поле**

В статье представлены результаты экспериментального исследования испарения одиночной капли дистиллированной воды и капли водного раствора NaCl в неподвижной воздушной среде в электрическом поле плоского конденсатора.

Экспериментальные исследования испарения капель чистых жидкостей и капель растворов солей представляют до настоящего времени определенный интерес для уточнения целого ряда неясных моментов в физике фазовых переходов первого рода ( влияние двойного электрического слоя на испарение капель воды, расчет коэффициента захвата (конденсации), выполнение закона Срезневского и закона Рауля, влияние положительных и отрицательных ионов на испарение капель растворов солей металлов и др.) [1, 2, 3]. Испарение и конденсация являются определяющими во многих технологических процессах. Опреснение морской воды, плазмо-термическое получение окислов некоторых металлов из водных растворов солей [4], получение информации о тепловом излучении поверхностей океанов и морей с помощью космической орбитальной техники существенно зависит от физико-химических процессов обмена теплом и веществом в достаточно тонком слое между океаном (морем) и атмосферой [5]. В настоящее время сохранилась необходимость рассмотрения испарения капель слабых водных растворов солей для нужд метеорологии и, более того, все настойчивее проявляется потребность в экспериментальных и теоретических работах с точки зрения экологических проблем; например, опреснение морской воды для технических и пищевых целей.

В связи с выше сказанным нами проведены экспериментальные исследования испарения крупных одиночных капель водных растворов NaCl в неподвижной воздушной среде в постоянном электрическом поле плоского конденсатора.

#### **Методика эксперимента и результаты проведенных опытов**

Схема экспериментальной установки для определения скорости испарения капель растворов приведена на рис.1.

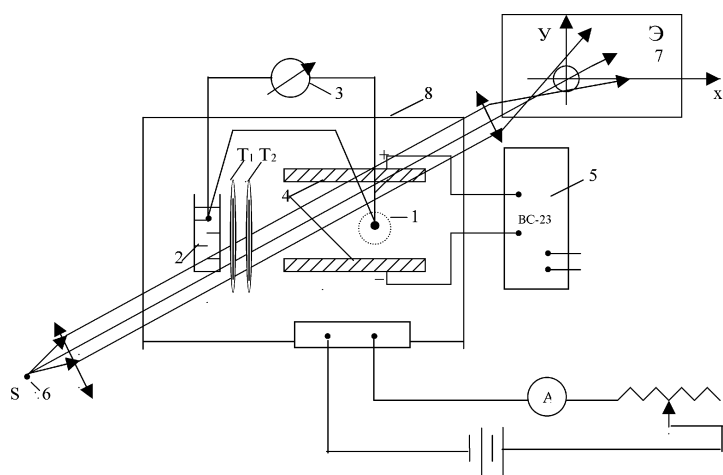


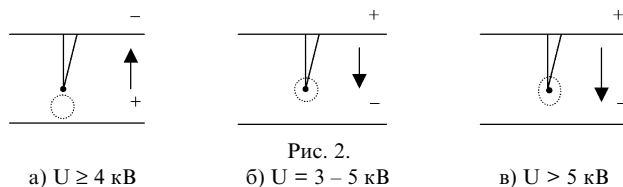
Рис.1. Схема экспериментальной установки.

Исследуемая капля подвешивалась на один из спаев дифференциальной термопары (1), второй спай которой был помещен в пробирку с тающим льдом (2). Возникающая ЭДС термопары измерялась гальванометром, включенным в цепь стандартного магазина сопротивлений (3). Медь-константановая термопара предварительно градуировалась по показаниям эталонного ртутного термометра в диапазоне от  $0^{\circ}\text{C}$  (тающий лед) до  $100^{\circ}\text{C}$  (кипящая вода). Температура капли измерялась с точностью  $0,5\text{ K}$ . Спай термопары, на который подвешивались капли, имел форму шарика диаметром  $2 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ . На промытый в спирте, а затем дистиллированной воде, шарик можно было с помощью пипетки подвесить довольно крупные капли, до  $5 \cdot 10^{-3}\text{ м}$  диаметром. Капли, как правило, имели сферическую форму. В случае нарушения сферичности капли за счет её веса или внешнего электрического поля измерялись горизонтальный и вертикальный диаметры и определялось его среднее значение. Сильно искаженные по форме капли исключались из рассмотрения. Начальный размер (диаметр) капли и последующее измерение размера определяли по теневому увеличенному изображению капли на экране (7). Капля освещалась параллельным пучком света (6). Оптическое увеличение системы — 8,4 раза. Положение края капли определяли с точностью  $0,5\text{ мм}$ . Среднеквадратичная относительная ошибка измерения размеров капли не превышала  $2,5\%$ .

Для создания электрического поля был использован плоский конденсатор (4). Площадь каждой пластины  $36\text{ см}^2$ , расстояние между обкладками  $6\text{ см}$ . Разность потенциалов на обкладках конденсатора можно было менять с помощью высоковольтного выпрямителя BC-23 (5) от 3 до  $10\text{ кВ}$ , что соот-

ответствует изменению напряженности поля от 500 до 1660 В/см. Опыты проведены при разности потенциалов между обкладками конденсатора от 3 до 7 кВ, т.е. напряженности поля от 500 до 1170 В/см, через 1 кВ.

При исследовании испарения капель воды и водных растворов желательнее учитывать направление линий напряженности электрического поля (полярность), так как капля устойчиво висит на подвесе при положительном потенциале верхней пластины конденсатора, если пластины расположены горизонтально. При отрицательном потенциале на верхней пластине капля срывается уже при 4 кВ (рис.2 а). При напряжениях свыше 5 кВ сферичность капли нарушается и при положительном потенциале на верхней пластине капля ползёт вверх по подвесу (рис.2 в). В этом случае необходимо измерять вертикальный и горизонтальный диаметры капли и вычислять среднее значение.



Термопара с каплей и конденсатор помещались в камеру с прозрачными стенками объемом  $15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  (8), т.е. капля была изолирована от окружающей среды, и её можно было наблюдать визуально. Температура в камере поддерживалась постоянной с помощью небольшого нагревательного прибора с терморегулятором (9), что позволило держать температуру в камере равной  $(36 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ .

Перед началом проведения измерений воздух в камере прогревался в течение 30 мин. За это время в ней устанавливалась постоянная температура. Во время проведения всего эксперимента неоднократно измерялась влажность в лабораторном помещении и камере. На протяжении всех опытов влажность в камере поддерживалась постоянной —  $(80 \pm 2)\%$ .

Как уже отмечалось выше, для исследования выбраны растворы NaCl. Этот выбор сделан исходя из следующих соображений:

1. хорошая растворимость NaCl в воде;
2. значительное количество NaCl в природной воде (в облаках, туманах, морской воде);
3. возможность сравнения результатов эксперимента с данными других авторов.

По стандартной методике готовились 5%, 10% и 15% растворы. На микровесах с точностью до 1 мг взвешивалась предварительно очищенная выпариванием пищевая соль и растворялась в дистиллированной воде. Количество соли и воды, необходимое для приготовления растворов соответствующей концентрации, рассчитывалось по соотношению:

$$c = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100 \%,$$

где  $m_1$  — количество растворенного вещества в граммах;

$m_2 = (m + m_1)$  — количество раствора в мл;

$m$  — количество воды в мл;

$c$  — процентная концентрация.

Для отработки методики и с целью оценки достоверности результатов проведены опыты по испарению каплей дистиллированной воды. Результаты сопоставлены с данными Кирюхина [10], Лушников, Загайнова, Нужного [2] (рис.3).

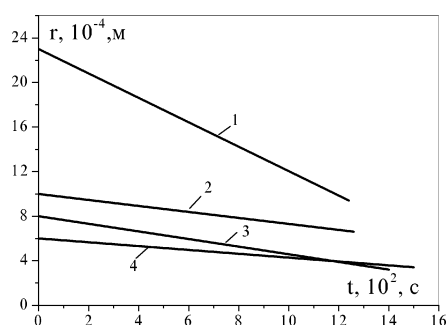


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных по испарению каплей дистиллированной воды.

1 — данные авторов статьи; 2 — Лушников и др. [3];  
3 — Зак [9]; 4 — Кирюхин [10].

Результаты опытов по скорости испарения каплей растворов различной концентрации в электрическом поле и при  $E=0$  приведены на рисунках 4 и 5. На рисунке 4 — скорость испарения  $(ds/dt) = f(U)$ , на рис.5 —  $(ds/dt) = f(c)$ . По нашему мнению, такое представление результатов более информативно, хотя, конечно, графики принципиально не отличаются друг от друга.

#### Качественное объяснение результатов эксперимента.

На рис.3 приведены результаты по испарению каплей дистиллированной воды разных авторов. Результаты сопоставимы, хотя наша кривая расположена существенно выше и идет вниз более круто. Дело в том, что мы исследовали более крупные капли и при более высокой температуре в камере при практически одинаковых влажностях. Количественное сопоставление результатов сделано через тангенс угла наклона (по оси Y — значение радиуса капли  $r \cdot 10^{-4} \text{м}$ , по оси X — время  $t \cdot 10^2 \text{с}$ ) и приведено в таблице.

Таблица.

Влажность, %	Температура капли, К	$\operatorname{tg}\alpha=\Delta y/\Delta x$	Авторы работы
85,0	288,7	0,1714	Кирюхин [10]
80,0	293,0	0,2667	Зак [9]
—	—	0,3000	Лушников и др. [2] *)
80,0	309,0	1.0816	Данные авторов статьи

\*) Следует отметить, что в работе [2] не приведены значения  $T_k$  и влажности в камере. Мы взяли кривую, полученную при давлении 750 мм.рт.ст., газ-носитель – Не. Авторы утверждают, что состав газа и давление в камере не сказываются на результатах опытов в интервале значений коэффициента захвата от 0,31 до 0,36 (стр.12)

По нашему мнению, противоречия в данных нет, и качественно результаты сопоставимы. Следовательно, выбранная нами методика приемлема для исследования испарения капель не только чистых жидкостей, но капель водных растворов солей.

Вопреки существующему мнению некоторых авторов [7, 10] о том, что электрическое поле не влияет на испарение капли, мы получили четкую зависимость между скоростью испарения ( $ds/dt$ ) и величиной приложенного напряжения. Скорость испарения капли дистиллированной воды уменьшается с ростом разности потенциалов на обкладках конденсатора (рис.4).

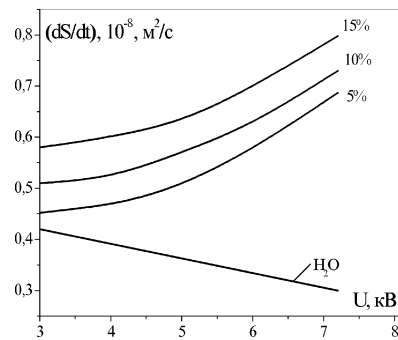


Рис.4. Скорость испарения капли водного раствора NaCl в электрическом поле.  $T_k=36^{\circ}\text{C}$ . Влажность среды 80 %.

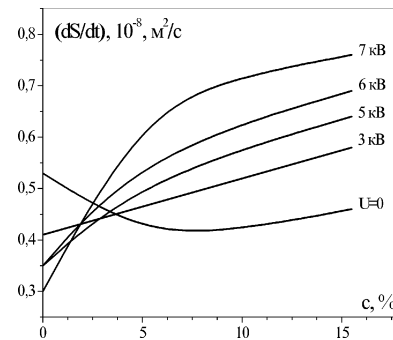


Рис.5. Скорость испарения капли водного раствора NaCl в зависимости от концентрации — c. Влажность 80 %,  $T_k=36^{\circ}\text{C}$ .

По нашему мнению в этом случае существенную роль играет взаимодействие двойного электрического слоя капли с внешним электрическим полем [3]. Скорость испарения капель водных растворов NaCl растет, и растет тем больше, чем больше внешнее поле и выше концентрация раствора (рис.4 и 5). В данном случае первостепенную роль, по нашему мнению, играет концент-

рация ионов, как положительных, так и отрицательных. Особенно существенен вклад ионов при малых концентрациях растворенного вещества (рис.5). Нам кажется, что на этот факт следует обратить внимание при разработке технологии опреснения морской воды методом её диспергирования.

Более серьёзное и конструктивное (не только качественное, но и количественное) обсуждение результатов можно провести, если сопоставить эксперимент с существующими моделями испарения (кинетической и диффузионной) — старой (классической) или современной (более изощрённой) с элементами статистики и электрофизики.

#### Литература

1. Козырев А.В., Ситников А.Г. Испарение сферической капли в газе среднего давления //УФН, 2001. Т.171, № 7.С.765-774.
2. Лушников А.А., Загайнов В.А., Нужный В.М. Расчет скорости испарения капель воды и сопоставление с экспериментом. //ФАС, 2001. В.38.С.109.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии. М.: Химия. 1989.С. 61,73.
4. Тихомиров В.А., Кареичин А.Г., Квеско С.Б. Расчет параметров плазмотермического процесса переработки диспергированных водных растворов солей металлов //Физика и химия обработки материалов, 1984, №5.
5. Бреховских А.М. Стратегия исследований мирового океана и использование его ресурсов. Сб. Будущее науки, М., 1984.
6. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Издание АН СССР, 1958. С.89.
7. Райст П. Аэрозоли. М.:Мир, 1987.
8. Суслов А.В., Контуш С.М. Стационарные заряды капель в биполярной ионной среде, обусловленные двойным электрическим слоем //ФАС, 1983.В.23. С.109.
9. Зак Е.Г. Кинетика испарения капель жидкостей //Журнал геофизики, 1936. Т.6, В.5.С.484.
10. Кирюхин Б.В. Испарение капель воды и водных растворов соли //Труды научно-исследовательских учреждений Гидрометслужбы СССР. 1945. В.7.С.39.

*М. Чесноков, І. Казакова, Т. Гризунова*  
(*Одеський національний університет ім.І.І.Мечникова*),  
*І. Андріанова*  
(*Одеський державний екологічний університет*)

**Випаровування краплин водних розчинів NaCl  
в електричному полі**

**АНОТАЦІЯ**

У статті представлені результати експериментального дослідження випаровування одиночної краплини дистілюваної води та краплини водного розчину NaCl в нерухомому повітряному середовищі в електричному полі плоского конденсатора.

*Chesnokov M., Kazakova I., Gryzunova T.*  
(*Odessa national university by I.I.Mechnikov*)  
*Andrianova I.*  
(*Odessa state ecology university*)

**Evaporation of NaCl water solutions under constant electric field**

**SUMMARY**

The experimental results of NaCl water solution drops evaporation in motionless air medium under constant electric field are presented in the article.