

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

ЗАО «Новбытхим», 199026, Санкт-Петербург, В.О.

Косая линия, д. 156

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), 190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 26

Исследовано влияние неоднородного электрического поля на скорость испарения ряда органических жидкостей. В переменном (0.1 Гц) поле, создаваемом над поверхностью жидкости, скорость испарения увеличивается до 5 раз, в зависимости от геометрии системы. Увеличение частоты переменного поля ускоряет испарение жидкости. Постоянное неоднородное электрическое поле не оказывает заметного влияния на кинетику испарения в тех же условиях. При ориентации градиента потенциала поля по направлению потока массы приближение области действия поля к поверхности жидкости приводит к уменьшению скорости испарения, при обратной ориентации – к увеличению. Для серии из 33 органических соединений увеличение летучести в электромагнитном поле не зависит от природы жидкости.

Ключевые слова: неоднородное электрическое поле, испарение, органическая жидкость,

Электрическое поле давно используется как фактор влияния на процессы переноса, протекающие на границах раздела фаз [1]. В частности, не ослабевает интерес к изучению воздействия коронного разряда [2] и постоянного электрического поля [3] на кинетику испарения воды, проводятся исследования воздействия переменных электрических полей на процессы сушки [4]. В силу очевидных экспериментальных трудностей аналогичные исследования процессов с участием различных соединений под воздействием неоднородных полей проводятся достаточно редко. Тем не менее, как было обнаружено в работе [5] именно неоднородные электрические поля в отличие от однородных оказывают заметное влияние на кинетику диффузии органических соединений в газообразном состоянии.

Настоящая работа является продолжением поиска [5-7] практических приложений действия электрического поля на процессы переноса в газах и на границе раздела газ-жидкость. В частности, нас интересует разработка технологии разделения жидких смесей при комнатной температуре и незначительных затратах энергии, необходимых для создания поля.

В предыдущей работе [5] было изучено действие электрического поля на диффузию паров ряда органических соединений. Мы использовали неравновесную систему в виде замкнутого цилиндрического сосуда. В нижней части цилиндра жидкость испарялась, пары поступали через зону действия поля в верхнюю часть, где поглощались твердым сорбентом. Создание неоднородного переменного поля на пути диффузии паров жидкости нарушало установившееся состояние и приводило к увеличению или уменьшению давления, вероятно, за счет изменения профиля концентраций рабочего вещества в зоне действия поля.

В настоящей работе мы решили упростить объект исследования (рисунок 1а, б), отказавшись от сорбента, то есть исследовать влияние электрического поля на скорость испарения органических жидкостей из открытого цилиндрического сосуда. Мы использовали стеклянный цилиндр (его объем 90 мл, размеры указа-

ны на рисунке 1), содержащий 10 мл исследуемой жидкости. Пары жидкости диффундируют от поверхности раздела фаз в верхнюю часть цилиндра и далее в атмосферу. Квазиравновесное состояние, то есть постоянная скорость испарения достигается через 20-40 мин после помещения образца растворителя в сосуд.

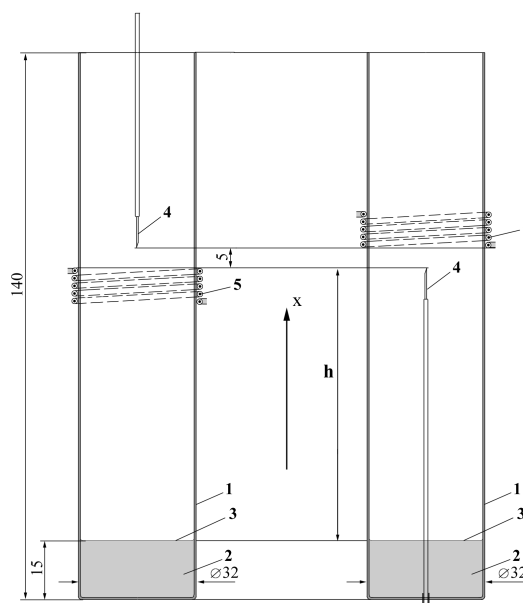


Рис. 1 а

Рис. 1 б

Рисунок 1. Схема установки для исследования скорости испарения жидкости в электрическом поле. 1 - сосуд (стеклянный цилиндр); 2 - жидкость; 3 - граница раздела фаз; 4 - игла (катод) из нержавеющей стали; 5 - спираль (анод) из медной проволоки, в изоляции из фторопластовой трубки.

Как и в предыдущей работе, электрическое поле создавали в средней части цилиндра, с помощью электро-

¹ Селитреников Алексей Васильевич, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. научно-исследовательской лаборатории ЗАО «Новбытхим», e-mail: selitrenikov@newchem.ru

² Зевацкий Юрий Эдуардович, канд. хим. наук, докторант СПбГИ(ТУ) заведующий научно-исследовательской лабораторией ЗАО «Новбытхим», e-mail: yuri@newchem.ru

дов в виде иглы и спирали, соединенных с источником высокого напряжения. Положение иглы и главной оси спирали совпадает с осью цилиндра. Таким образом, область максимальной неоднородности поля находится на пути массообмена (ось x). Фторопластовая изоляция спирали обеспечивает отсутствие заметного (свыше 10 нА) постоянного тока через кювету при напряжениях до 20 кВ, то есть подача напряжения на электроды не приводит к заметному нагреванию системы.

В разных сериях опытов мы использовали два варианта ориентации электродов: градиент потенциала направлен вдоль оси x , $dE/dx > 0$ (рисунок 1а) или против x , $dE/dx < 0$ (рисунок 1б). Изменяли положение зоны действия поля относительно поверхности жидкости (высота h), при постоянном расстоянии между электродами.

Контролируемым параметром была убыль массы жидкости в сосуде за 20 мин действия поля (Δm). Цилиндр взвешивали с точностью до 1 мг в опытах с летучими и 0.1 мг – с малолетучими жидкостями. Обычно опыты проводили до получения 3-5 последовательных значений Δm , отличающихся друг от друга не более чем на 10%, и определяли среднее. Полученные значения скорости испарения в электрическом поле сравнивали с данными в отсутствие поля (Δm_0 , холостой опыт) в тех же условиях.

Предварительные опыты с хлороформом в качестве рабочей жидкости показали увеличение скорости испарения в переменном поле. При использовании синусоидального напряжения с амплитудным значением (U_a) 20 кВ и частотой 0.05, 0.1 и 0.2 Гц были получены значения $\Delta m/\Delta m_0$ 2.80, 3.17 и 3.94 для $dE/dx > 0$ (рисунок 1а, h 80 мм) и 1.54, 1.63 и 1.73 для $dE/dx < 0$ (рисунок 1б, h 80 мм). Таким образом, увеличение частоты (dE/dt) ускоряет испарение жидкости, но влияние геометрии системы сильнее влияния частоты.

Постоянное поле (U 20 кВ) в аналогичных условиях практически не изменяло летучесть хлороформа ($\Delta m/\Delta m_0$ 1.02 - 1.13) независимо от полярности подключения электродов. Смешивание постоянного (U 20 кВ) и переменного (U_a 20 кВ, 0.1 Гц) напряжения не изменяло значений $\Delta m/\Delta m_0$ более чем на 10%, также независимо от полярности. Следовательно, направление вектора напряженности поля E не имеет значения, влияние постоянной составляющей напряжения ($dE/dt = 0$) мало или отсутствует. По соображениям удобства мы использовали смешанное напряжение (U 20 кВ, U_a 20 кВ, 0.1 Гц), иглу подключали к катоду, а спираль – к аноду источника напряжения.

Далее мы получили данные о скорости испарения хлороформа в зависимости от положения электродов над поверхностью раздела фаз (рисунок 2).

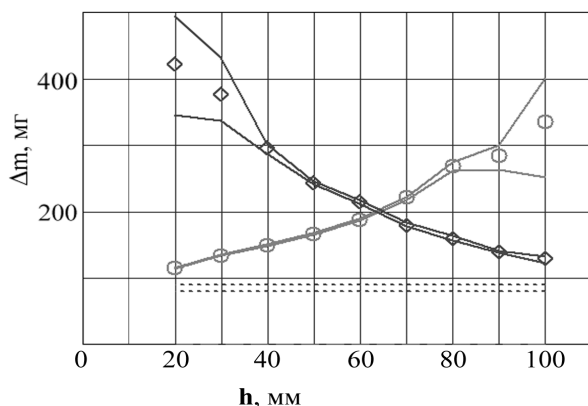


Рис. 2

Рисунок 2. Зависимость скорости испарения хлороформа от положения электродов по высоте цилиндра. $\circ$ - средние значения Δm , геометрия установки соответствует рисунку 1а; $\diamond$ - средние значения Δm , геометрия установки соответствует рисунку 1б; сплошными линиями показаны минимальные и максимальные значения Δm , пунктирными линиями - диапазон значений Δm_0 для холостых опытов.

Для геометрии системы, соответствующей рисунку 1а ($dE/dx > 0$) наибольшая скорость испарения наблюдалась при создании неоднородного поля в верхней части сосуда (h 90-100 мм), причем значения $\Delta m/\Delta m_0$ изменялись в широких пределах, в зависимости от неизвестных нам факторов. При приближении зоны действия поля к поверхности жидкости скорость испарения уменьшалась, ее значения воспроизводились в пределах 10%. Для геометрии, соответствующей рисунку 1б ($dE/dx < 0$) мы получили обратную зависимость. Аналогичные зависимости были получены для дихлорметана, гексана и тетрагидрофурана.

Мы провели серию опытов по испарению ряда органических жидкостей в переменном поле, для двух вариантов геометрии системы (рисунок 1а, б; h 80 мм). В координатах (Δm_0 , Δm) получили линейные зависимости с коэффициентами корреляции более 0.995 (рисунок 3а, б). Средние значения $\Delta m/\Delta m_0$ (тангенсы угла наклона прямых) составили 2.93 и 1.72 для $dE/dx > 0$ и $dE/dx < 0$ соответственно (h 80 мм).

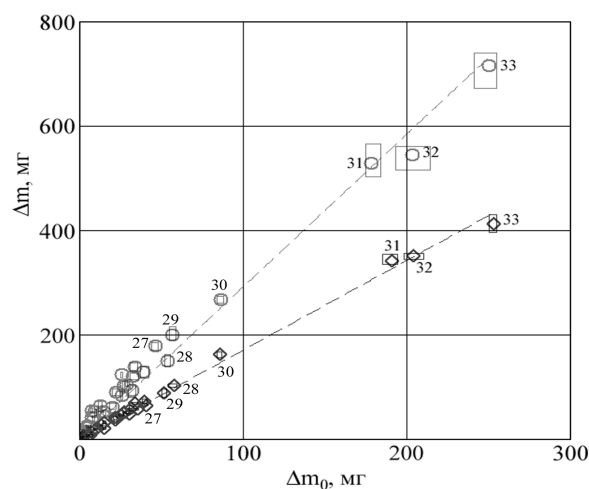


Рис. 3 а

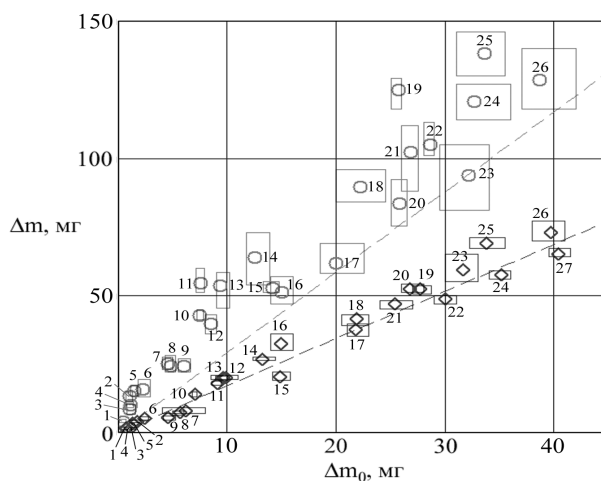


Рис. 3 б

Рисунок 3. Зависимость скорости испарения в поле от скорости испарения в холостом опыте для ряда органических жидкостей. $\circ$ - средние значения (Δm_0 , Δm), геометрия установки соответствует рисунку 1а, h 80 мм; $\diamond$ - средние значения (Δm_0 , Δm), геометрия установки соответствует рисунку 1б, h 80 мм; прямоугольниками обозначены минимальные и максимальные значения (Δm_0 , Δm) для каждой жидкости. 1 - дипентильовый эфир, 2 - циклогексанон, 3 - н-бутанол, 4 - трет-бутанол, 5 - изо-бутанол, 6 - орто-ксилол, 7 - н-пропанол, 8 - хлорбензол, 9 - уксусная кислота, 10 - нитрометан, 11 - толуол, 12 - изо-пропанол, 13 - этанол, 14 - 2,2,4-триметилпентан, 15 - диоксан, 16 - гептан, 17 - 1-бромбутан, 18 - ацетонитрил, 19 - трихлорэтилен, 20 - этилацетат, 21 - бензол, 22 - метанол, 23 - циклогексан, 24 - 1-хлорбутан, 25 - диизопропиловый эфир, 26 - гексан, 27 - тетрагидрофуран, 28 - тетрахлорметан, 29 - ацетон, 30 - хлороформ, 31 - дихлорметан, 32 - диэтиловый эфир, 33 - бромэтан.

В тех же условиях при использовании "чистого" переменного напряжения 3 кВ (действующее значение) промышленной частоты 50 Гц были получены близкие по величине значения $\Delta m/\Delta m_0$: 2.14 для рисунка 1а и 2.38 для рисунка 1б.

Отсутствие зависимости $\Delta m/\Delta m_0$ от природы растворителя ставит под сомнение возможность разделения жидких смесей данным методом.

Полученные данные позволили выделить основные факторы, которые влияют на скорость испарения жидкой фазы в электрическом поле: скорость изменения напряженности поля (dE/dt) и геометрия системы. Те же факторы определяли знак и величину изменения давления (Δp) в предыдущей работе [5]. Напротив, постоянная составляющая поля и направление вектора напряженности поля E (полярность включения электродов) не влияют на наблюдаемые эффекты.

Предложенная ранее гипотеза об анизотропном влиянии неоднородного поля на коэффициент диффузии паров растворителя (диффузия затрудняется в направлении положительных значений dE/dx и облегчается в противоположном направлении) не позволяет удовлетворительно объяснить влияние положения электродов на скорость испарения (рисунок 2).

Область высокой напряженности поля в наших экспериментах расположена далеко от поверхности раздела фаз. Возможно, электрическое поле не оказывает **прямого** влияния на процесс испарения жидкости, а увеличение летучести жидкости происходит вследствие **гидродинамических** процессов в газовом промежутке, то есть возникновением потоков газа за счет выделения на электродах Джоулева тепла либо ионного ветра.

Величина dE/dt пропорциональна амплитуде и частоте переменной составляющей напряжения на электродах. Серия опытов по испарению хлороформа (таблица) показала, что амплитуда в большей степени влияет на летучесть жидкости, чем частота, при этом потери мощности на электродах не превышали 1.4 мВт.

Таблица. Влияние частоты, амплитуды и активной мощности на летучесть хлороформа в условиях рис. 1 а.

Частота, Гц	Увеличение летучести $(\Delta m_1)/(\Delta m_0)$, раз		
	(Активная мощность, мВт)		
	U ~ 3 кВ; U = 20 кВ	U ~ 7 кВ; U = 20 кВ	U ~ 12 кВ; U = 20 кВ
1.0	1.29 (0.06)		
0.5	1.23 (0.05)	3.09 (0.56)	
0.2	1.19 (0.04)	2.58 (0.26)	3.29 (1.34)
0.1	1.21 (0.06)	2.38 (0.17)	2.80 (0.72)
0.05	1.24 (0.06)	1.94 (0.14)	2.60 (0.41)
0	U ~ 0 кВ; U = 20 кВ		
	1.08 (0.02)		

Для частоты 50 Гц увеличение действующего значения переменного напряжения с 3 до 6 кВ (рисунок 1а; h 80 мм) приводит к увеличению $\Delta m/\Delta m_0$ с 3.5 до 16.5 раз, при этом потери мощности, измеренные методом "трех амперметров" [8] достигают 22 ± 4 мВт.

Замена иглы на источник тепла (активное сопротивление) мощностью до 25 мВт не приводит к заметному увеличению скорости испарения жидкости, а в случае 100 мВт последняя увеличивалась лишь в 1.2 .. 1.6 раза, в зависимости от положения источника тепла по высоте цилиндра. Таким образом, возможное влияние конвекционных потоков за счет нагревания зоны действия поля можно исключить.

Ионный ветер [9] может наблюдаться при использовании неизолированных высоковольтных электродов с малым радиусом кривизны, в тех случаях, когда напряженность поля вблизи острия достаточно высока для ионизации молекул газа. В зависимости от знака заряда острия, молекулы газа теряют, либо приобретают электроны, образуются ионные кластеры, которые

под действием кулоновских сил движутся в направлении электрода противоположного знака, и передают импульс нейтральным молекулам при столкновениях с ними.

Нам удалось обнаружить движение воздуха за счет ионного ветра визуально, когда стеклянный цилиндр на рисунке 1 заменили отрезком стеклянной трубы того же диаметра и заполнили газовый промежуток туманом хлорида аммония. При использовании постоянного напряжения 20 кВ движение воздуха вдоль оси цилиндра, по направлению иглы, наблюдалось только в моменты включения и выключения источника напряжения, независимо от полярности включения электродов. При наличии переменной составляющей напряжения движение воздуха продолжалось в течение всего времени действия последнего.

В случае постоянного напряжения на электродах ионизация газа продолжается в течение 1 ... 3 с после включения/выключения источника, за это время на внутренней поверхности стеклянного цилиндра нависает заряд, противоположный по знаку заряду спирали. Этот заряд экранирует поле в газовом промежутке, напряженность поля в области острия снижается до величин, недостаточных для ионизации газа. В этот момент ток через систему электродов достигает стационарного значения порядка нескольких нА.

Таким образом, отсутствие влияния постоянного высокого напряжения на явления, описанные в данной и предыдущей публикациях, можно объяснить малым временем существования электрического поля в газовом промежутке.

Наблюдаемое в работе [5] повышение давления паров Δp при $dE/dx > 0$ происходит в результате ускорения испарения жидкости при обдуве ее поверхности, а уменьшение Δp при $dE/dx < 0$ - ускорения сорбции при обдуве поверхности сорбента.

Увеличение летучести жидкостей при использовании переменного напряжения на электродах (рисунок 1а, б) также происходит за счет ионного ветра, который перемешивает пары жидкости в цилиндре вне зависимости от знака dE/dx , в результате облегчается перенос вещества от поверхности раздела фаз к верхнему краю цилиндра. Зависимости, показанные на рисунке 2 могут быть следствием взаимодействия восходящих и нисходящих потоков газа по объему цилиндра.

Наибольшую скорость испарения хлороформа $(\Delta m_1)/(\Delta m_0)$ 22...26 при U 6 кВ, 50 Гц, удалось получить после замены цилиндра (рисунок 1а) отрезком стеклянной трубы высотой 90 мм, при этом жидкость находилась в стакане диаметром 60 мм, расстояние от острия иглы до поверхности жидкости h 80 мм.

При этом нисходящий поток воздуха создавал реактивную подъемную силу 20...22 мН (измерена взвешиванием электродов под напряжением и без). Оценка величины статического давления с помощью жидкостного дифференциального манометра, одно из колен которого соответствовало по размерам цилиндру (рисунок 1а) дала значение в пределах 0.5...1.0 Па.

Данный процесс удалось смоделировать с помощью струи сжатого воздуха, полученной с помощью мало-мощного компрессора и выходящей из стальной трубки (внутренний диаметр 1.2 мм). Стальную трубку поместили на место электрода — иглы так, чтобы положение ее выходного отверстия соответствовало положению острия на рисунке 1а. При объемном расходе воздуха 8.9 мл/с под избыточным давлением около 2400 Па удалось достигнуть подобия потока воздуха как по скорости испарения хлороформа $(\Delta m_1)/(\Delta m_0)$ 23.9, так и по величинам реактивной силы (24...26 мН) и статического давления (около 0.5 Па). Температура не испарившегося остатка жидкости падает по экспоненте, в обоих случаях показатели экспоненты близки, что также свидетельствует о подобию процессов.

Литература

1. *Зубарев Д.Н.* Неравновесная статистическая термодинамика / М.: Наука, 1971. 416 с.
2. *Кулешов П.С.* Экспериментальное изучение взаимодействия коронного разряда и испарения воды // Исследовано в России: сетевой журн. 2005. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/227.pdf>. (дата обращения: 17.11.2005)
3. *Красиков Н.Н.* О бесконтактном электрополевым воздействии на жидкие системы // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып.10. С. 120-121.
4. *Самонин В.В., Подвязников М.Л., Шевкина А.Ю., Тарасова А.А.* Влияние электромагнитного поля на процесс сорбции паров на силикагеле // Известия СПбГТИ (ТУ). 2009. № 6(32). С. 57-59.
5. *Селитреников А.В., Зевацкий Ю.Э.* Диффузия паров органических соединений в неоднородном электрическом поле. // Известия СПбГТИ (ТУ). 2008. №3(29). С. 54-56.
6. Способ и устройство для охлаждения рабочего тела и способ генерации микроволнового излучения: пат. 2182689 Рос. Федерация. № 2001116712; заявл. 14.06.2001; опубл.20.05.2002. Бюл. № 19
7. Устройство для охлаждения рабочего тела: свид. на полезную модель № 30422. Рос. Федерация. № 2003100928; заявл. 09.01.2003; опубл. 27.06.2007. Бюл. № 3. 10 с.
8. Электрорадиоизмерения. Под. ред. *Винокурова В.И.* М.: Высшая школа., 1986. 352 с.
9. *Поль Р.* Учение об электричестве. М.: Гос. изд-во физ-мат. лит-ры, 1962. 517 с.