

УДК 536.423+543.3+544.2

Г. В. Базаянц, д-р техн. наук, проф., В. Д. Доненко, О. Б. Калашникова
Автомобильно-дорожный институт ГВУЗ «Донецкий национальный
технический университет», г. Горловка

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ИСПАРЯЕМОСТИ КАПЕЛЬ H_2O , C_2H_5OH И CCl_4 НА ПЕРЕГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА

На основе экспериментальных данных по испарению капель воды, этилового спирта и тетрахлолрметана в сфероидальном состоянии на перегретой латунной подложке показано, что использование ранее разработанной методики определения молярной скорости испарения позволяет корректно сравнивать их испаряемость. В качестве сравнительного показателя рассмотрена возможность использования константы скорости испарения капли при данной температуре либо интегральной характеристики, равной среднему значению константы скорости в заданном интервале температур подложки. Более перспективной в этом качестве расценивается энергия активации пленочного кипения жидкости.

Актуальность проблемы

От скорости испарения жидкости при ее контакте с перегретой поверхностью твердого тела зависит интенсивность технологических процессов во многих отраслях техники, включая сжигание жидких топлив в двигателях внутреннего сгорания автомобилей, получение пара высокого давления в парогенераторах тепловых электростанций, охлаждение режущего инструмента при механической обработке металлов, закалке металлических изделий и пр. При этом корректное сопоставление результатов исследований этих процессов способствует успеху поиска оптимальных жидкостей.

Состояние проблемы

Как отмечено в [1], интерес к процессам, протекающим при нагреве капель жидкостей, наносимых на перегретую поверхность металлов, зародился в конце XIX и начале XX века (Срезневский, Максвелл, Ленгмюр и др.), оживился в середине XX века (Ребиндер, Спелдинг, Федосеев, Селиванов, Боришанский и др.) и вновь актуализировался в наше время в связи со сжиганием одно- и многокомпонентных жидких топлив. При этом в качестве критерия сравнения разных жидкостей использовалась объемная скорость их испарения в $см^3/с$.

Критический анализ существующего уровня исследований

Для объективного сравнения испарительной способности жидкостей разной природы объемная скорость испарения в качестве критерия малопригодна [2]. В этом плане гораздо более приемлемой является их молярная скорость. Учитывая аналогию физического процесса испарения жидкости с физико-химическим процессом разложения некоторых сложных химических соединений на более простые [3], представляется достаточно обоснованным использовать математический аппарат, связывающий число молей V испаряемой жидкости с константой скорости K при данной температуре и скоростью U испарения в моль/л уравнением

$$U = K \cdot V, \quad (1)$$

количество испаряемой жидкости V в момент времени τ с его количеством V_0 в исходном состоянии соотношением

$$\ln v = \ln v_0 - K \cdot \tau, \quad (2)$$

а период полупревращения испаряемой жидкости – с константой скорости K формулой

$$\tau_{1/2} \cdot K = \ln 2. \quad (3)$$

Цель работы

Целью настоящего исследования является использование разработанной ранее [2] методики определения кинетических характеристик процесса испарения капель жидкости в ее сфероидальном состоянии на перегретой поверхности твердого тела для выбора объективного критерия сравнительной испаряющей способности (летучести) однокомпонентных жидких систем различной природы.

Результаты исследований

Для достижения поставленной цели были использованы результаты экспериментов по испарению мелких сфероидов воды, этилового спирта и тетрахлорметана на латунной пластине толщиной 2 и 8 мм, опубликованные в работе [4]. Эти результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения времени жизни $\tau_{ж}$ капель дистиллированной воды, этилового спирта и тетрахлорметана в интервале температур нагрева латуни (450–800 К) и начальных радиусах капель r_0 [4]

Температура T , К	Время жизни капли $\tau_{ж}$, с, для жидкостей		
	H_2O , $r_0 = 2,23 \cdot 10^{-3}$ м	C_2H_5OH , $r_0 = 1,48 \cdot 10^{-3}$ м	CCl_4 , $r_0 = 1,30 \cdot 10^{-3}$ м
450	–	38	–
500	138	32	17,4
550	123	28	15,9
600	109	23	14,1
650	95	20	12,6
670	–	19	11,7
700	87	–	11,0
750	80	–	9,1
800	75	–	8,2

Принимая среднее значение критического радиуса капель всех трех жидкостей на финальном этапе их испарения (в момент времени $\tau = \tau_{ж}$), равным $r_k = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м, по формуле

$$v = \frac{4\pi r^3 \rho}{3M} \quad (4)$$

определено количество вещества каждой из них в исходном состоянии v_0 и в конечной фазе v_k процесса испарения. Значения плотности ρ этих жидкостей приняты соответствующими их температурам, на 5–10 градусов ниже температур кипения при нормальном давлении, как это рекомендовано в [5]. Для воды это составляло 962000 г/м^3 , для спирта – 754100 г/м^3 и для

тетрахлорметана – 1500000 г/м^3 [6]. Температурная зависимость плотности этих жидкостей показана на рисунке 1, а их молярные массы M в формуле (4) приняты равными 18, 46 и 154 г/моль соответственно для H_2O , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и CCl_4 .

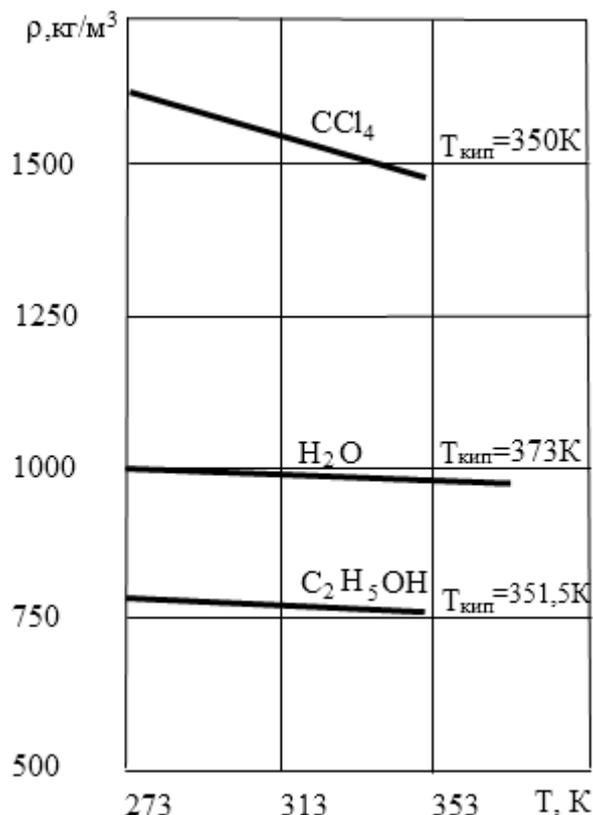


Рисунок 1 – Температурная зависимость плотности исследованных жидкостей [6]

После подстановки в (4) численных значений ρ , M , r_0 или r_k и последующего расчета исходного v_0 и конечного v_k количества вещества каждой жидкости получены следующие их значения в молях: для воды $v_0 = 2,483 \cdot 10^{-3}$ и $v_k = 3,498 \cdot 10^{-6}$; для этилового спирта $v_0 = 2,226 \cdot 10^{-5}$ и $v_k = 1,073 \cdot 10^{-7}$; для тетрахлорметана $v_0 = 8,964 \cdot 10^{-6}$ и $v_k = 6,375 \cdot 10^{-8}$.

На основании этих данных построены (рисунок 2) шкалы полупревращения для всех трех жидкостей в условиях их испытаний [4], на основе которых по формуле

$$n_i = n_m + \frac{v_k - v_m}{v_6 - v_m} \cdot (n_6 - n_m) \quad (5)$$

методом интерполяции получены $n_1 = 9,38$ периодов для H_2O , $n_2 = 7,59$ периодов для $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ и $n_3 = 3,72$ периода для CCl_4 ,

где n_i – число периодов полупревращения для i -той жидкости по шкале;

n_m и n_6 – меньшее (по сравнению с n_i) и большее число периодов на шкале;

v_k , v_m и v_6 – конечное, меньшее (по сравнению с v_k) и большее число молей жидкости по шкале полупревращения соответственно.

Тогда расчетом по формуле

$$\tau_{1/2} = \frac{\tau_{ж}}{n_x} \quad (6)$$

определены периоды полупревращения процесса испарения каждой из этих жидкостей, которые оказались равными величинам, указанным в таблице 2. Туда же включены значения констант K скорости процесса испарения, определенные по формуле

$$K = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}}, \quad (7)$$

а также число молей V вещества испаряемой жидкости, рассчитанные для разных стадий процесса, включая его исходное и конечное состояния, определенные из соотношения



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Шкалы полупревращения для капель воды (а), этанола (б) и тетрахлорметана (в) в условиях испытаний [4]

Таблица 2 – Результаты расчета периодов полупревращения $\tau_{1/2}$, констант скорости K , числа молей ν жидкостей в моменты времени τ и скоростей υ испарения капель при температурах T подложки (латунь) по экспериментальным данным [4]

T, K	$\tau_{ж}, c$	$\tau_{1/2}, c$	$K \cdot 10^2, c^{-1}$	$\nu \cdot 10^5, \text{ моль, при } \tau$				$\upsilon \cdot 10^5, \text{ моль/с, при } \tau$				
				0	0,1 $\tau_{ж}$	0,5 $\tau_{ж}$	$\tau_{ж}$	0	0,1 $\tau_{ж}$	0,5 $\tau_{ж}$	$\tau_{ж}$	
H₂O												
500	138	14,7	4,7	248,3	129,8	9,7	0,35	11,7	6,1	0,46	0,019	
600	109	11,6	6,0	248,3	129,0	9,4	0,35	14,9	7,7	0,56	0,024	
700	87	9,3	7,5	248,3	129,0	9,5	0,35	18,6	9,7	0,71	0,030	
800	75	8,0	8,7	248,3	129,0	9,5	0,35	21,6	11,2	0,83	0,035	
C₂H₅OH												
450	38	5,0	13,9	22,3	13,3	1,6	0,1	3,1	1,85	0,22	0,014	
500	32	4,2	16,5	22,3	13,3	1,6	0,1	3,7	2,19	0,26	0,016	
600	23	3,0	23,1	22,3	13,2	1,5	0,1	5,2	3,05	0,37	0,023	
670	19	2,5	27,7	22,3	13,3	1,6	0,1	6,2	3,68	0,44	0,028	
CCl₄												
500	17,4	4,7	14,7	9,0	7,1	2,5	0,06	1,3	1,0	0,37	0,088	
600	14,1	3,8	18,2	9,0	7,1	2,5	0,06	1,6	1,3	0,46	0,109	
700	11,0	3,0	23,1	9,0	7,1	2,6	0,06	2,1	1,6	0,60	0,139	
800	8,2	2,2	31,5	9,0	7,1	2,5	0,06	2,8	2,2	0,79	0,189	

На рисунке 3 показано влияние температуры подложки на время жизни $\tau_{ж}$ и период полупревращения $\tau_{1/2}$ капель исследованных жидкостей.

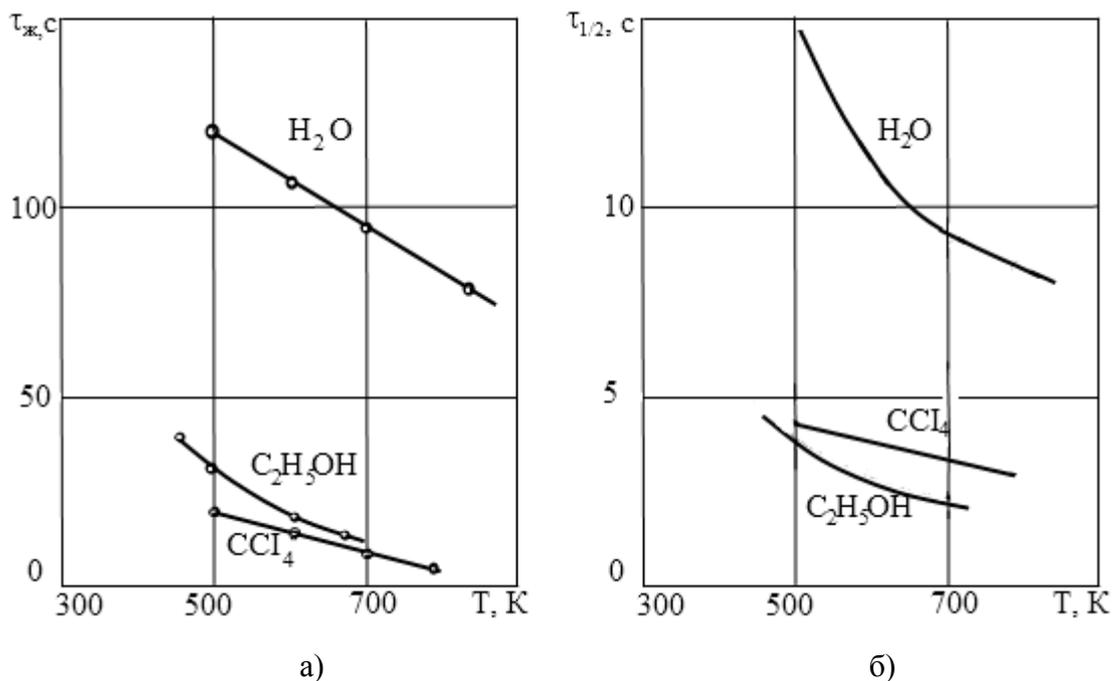


Рисунок 3 – Зависимость экспериментально определенного времени жизни $\tau_{ж}$ (а) и рассчитанного периода полупревращения $\tau_{1/2}$ (б) капель жидкостей от температуры подложки

При этом следует особо отметить, что величина $\tau_{ж}$ в гораздо большей степени

зависит от размеров капель в исходном состоянии, нежели от природы испаряемых жидких сред. Поэтому взаимное расположение кривых $\tau_{ж} = f(T)$ по вертикали на рисунке 3 а) для разных жидкостей может быть самым разным. В то же время влияние отмеченных факторов на величину констант скорости и значения периодов полупревращения противоположное влиянию на $\tau_{ж}$. Поэтому численные величины K или $\tau_{1/2}$ разных жидкостей при какой-либо температуре могут быть критерием сравнения их испаряющей способности.

Если в качестве сравнительного показателя испаряющей способности жидкости принять величину, равную константе скорости испарения K , то соотношение этих характеристик для исследованных однокомпонентных жидких сред при одинаковой температуре подложки $T = 600$ К, например, составит $K_{H_2O} : K_{CCl_4} : K_{C_2H_5OH} = 0,060:0,182:0,231 = 1,00:3,03:3,85$.

Для аналогичного сравнения средней испаряемости в интервале температур подложки $T_1 - T_2$ может быть использован интегральный показатель

$$\bar{K} = \int_{T_1}^{T_2} K \cdot dT.$$

Например, с помощью рисунка 4 можно графически определить площади, заключенные между горизонтальной осью координат и зависимостями $K = f(T)$ в температурном интервале $T_1 - T_2$. Это будут искомые интегралы для каждой жидкости. Применительно к исследуемым средам в температурном интервале (500–700 К), например, эти площади составляют: 960 мм² для H₂O; 2970 мм² для CCl₄; 3655 мм² для C₂H₅OH. Тогда

$$\bar{K}_{H_2O} : \bar{K}_{CCl_4} : \bar{K}_{C_2H_5OH} = 960:2970:3655 = 1,0:3,1:3,8.$$

Это значит, что в температурном интервале (500–700 К) средняя испаряемость (летучесть) CCl₄ на латунной подложке примерно в 3,1 раза, а C₂H₅OH – в 3,8 раз выше, чем H₂O.

В качестве альтернативного сравнительного показателя испаряемости жидкого сфероида на перегретой поверхности твердого тела рассмотрена энергия активации его пленочного кипения, рассчитанная по формуле

$$E_a = R \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{K_2}{K_1}, \quad (8)$$

где K_2 и K_1 – константы скорости испарения жидкостей при температурах подложки T_2 и T_1 .

По аналогии с процессами химического взаимодействия [3], под энергией активации пленочного кипения следует понимать некоторую пороговую энергию на пути перехода жидкости из режима пузырькового в режим пленочного кипения. Эта важная физико-химическая характеристика скорости протекания какого-либо процесса входит в состав классического уравнения Аррениуса

$$K = A \exp \left[\frac{-E_a}{RT} \right], \quad (9)$$

где $R = 8,314$ Дж/моль;

K – универсальная газовая постоянная;

A – предэкспоненциальный множитель;

T – температура подложки.

Физический смысл в рассматриваемом процессе A можно интерпретировать как долю молекул жидкости, энергия которых при температуре подложки T превышает величину E_a . Величина A не зависит от температуры подложки, а определяется только условиями, в которых протекает процесс пленочного кипения и испарения жидкости.

Энергия активации тоже не зависит от температуры подложки, что по сравнению с константой скорости испарения является несомненным ее преимуществом при использовании в качестве сравнительного показателя испаряемости жидкого сфероида.

Результаты расчета по формуле (8) энергии активации пленочного кипения исследованных жидких сред представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчета энергии активации E_a пленочного кипения исследованных жидкостей и предэкспоненциального множителя A на основе констант скорости испарения K_1 и K_2 при температурах подложки T_1 и T_2

Жидкость	T_1, K	T_2, K	K_1, c^{-1}	K_2, c^{-1}	$E_a, Дж/моль$	A
H_2O	500	800	0,047	0,087	6826	0,243
CCl_4	500	800	0,147	0,315	8448	1,122
C_2H_5OH	450	670	0,139	0,277	11394	2,922

Итоговые уравнения Аррениуса типа (9) для расчета констант скорости процесса испарения исследованных жидкостей в условиях испытаний имеют вид:

$$K_{H_2O} = 0,243 \exp \frac{-6826}{R \cdot T};$$

$$K_{CCl_4} = 1,122 \exp \frac{-8448}{R \cdot T};$$

$$K_{C_2H_5OH} = 1,122 \exp \frac{-8448}{R \cdot T}.$$

Использование E_a в качестве сравнительного показателя испаряемости воды, тетрахлорметана и этилового спирта приводит к следующему соотношению:

$$E_a(H_2O) : E_a(CCl_4) : E_a(C_2H_5OH) = 6826:8448:11394 = 1,00:1,24:1,67.$$

Качественно это соотношение аналогично рассчитанному по величине констант скорости испарения, но количественно они существенно различаются. Поскольку изложенные результаты обобщают сравнительно узкий круг исследованных жидких сред, предусмотрено продолжить работу в этом направлении.

Учитывая малые значения количества вещества в мелких каплях жидкостей и низкую скорость их испарения, выполнен пересчет (таблица 4) скоростей их испарения на миллимоли вещества в час (ммоль/час).

Зависимость скорости испарения всех трех жидких сред на границах исследованных температурных интервалов нагревания подложки представлена на рисунках 5–7 с учетом величины $\tau_{ж}$, указанной в таблице 2 для каждой жидкости при заданной температуре латуни. Из этих рисунков видно, что при общей закономерности снижения скорости испарения от максимальной величины в исходном состоянии капли до минимального ее значения в

момент времени $\tau_{ж}$ интенсивность этого снижения тем выше, чем выше температура подложки.

Таблица 4 – Скорость испарения U исследованных жидкостей в миллимолях в час на разных этапах процесса при температурах T подложки

T, К	U, ммоль/час, в момент времени τ			
	0	0,1 $\tau_{ж}$	0,5 $\tau_{ж}$	$\tau_{ж}$
H ₂ O				
500	421,2	219,6	16,6	6,8
600	536,4	277,2	20,2	8,6
700	669,6	349,2	25,6	10,8
800	777,6	403,2	29,9	12,6
C ₂ H ₅ OH				
450	111,6	66,6	7,9	5,0
500	133,2	78,8	9,4	5,8
600	187,2	108,0	13,3	8,3
670	223,2	132,5	15,8	10,1
CCl ₄				
500	4,7	3,6	1,3	0,3
600	5,8	4,7	1,7	0,4
700	7,6	5,8	2,2	0,5
800	10,1	7,9	2,8	0,7

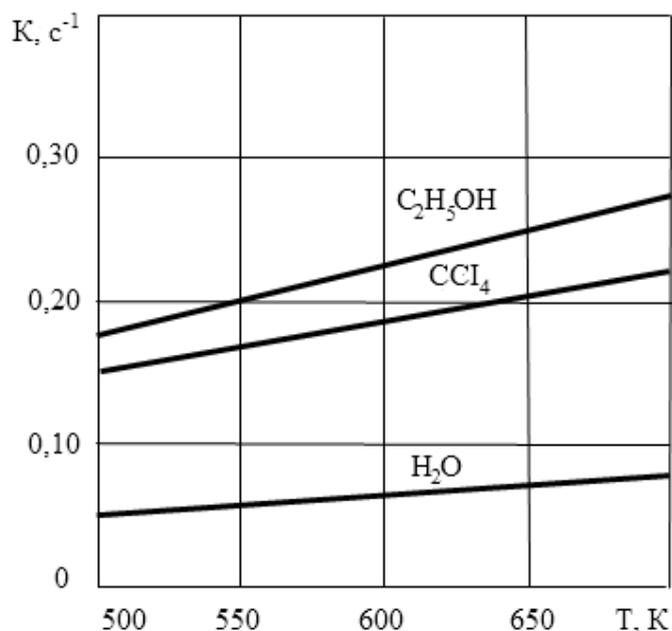


Рисунок 4 – Зависимость константы скорости испарения капель от температуры подложки

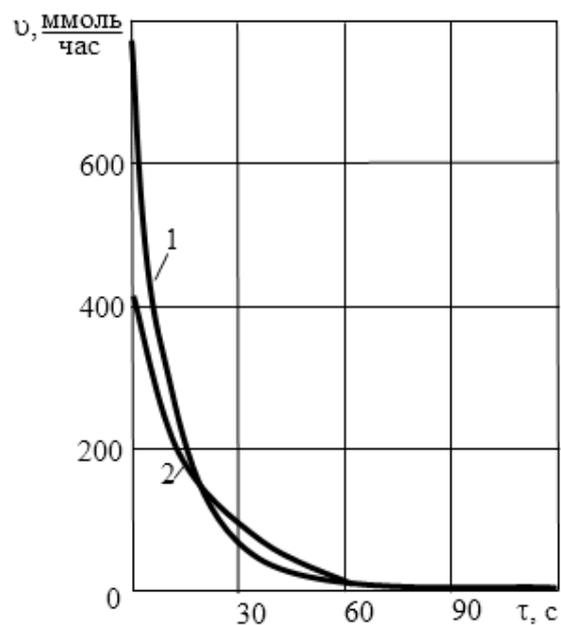


Рисунок 5 – Скорость испарения H_2O на подложке с температурой: 1 – 800 K; 2 – 500 K

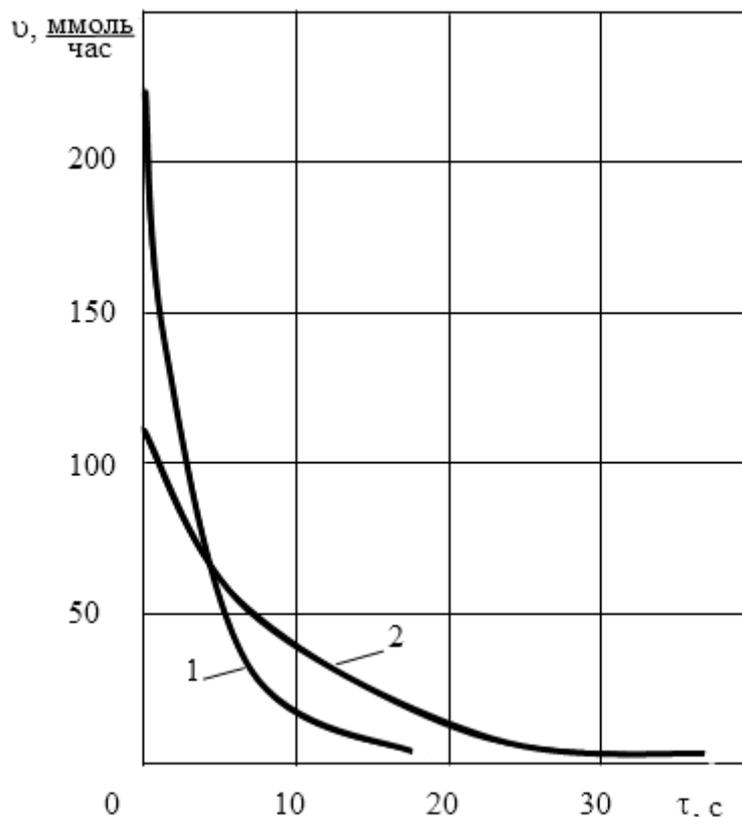


Рисунок 6 – Скорость испарения C_2H_5OH на подложке с температурой: 1 – 670 К; 2 – 450 К

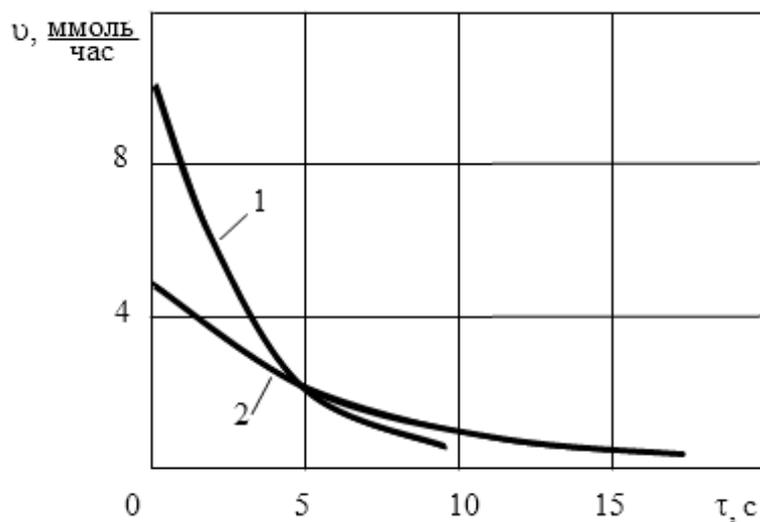


Рисунок 7 – Скорость испарения CCl_4 на подложке с температурой: 1 – 800 К; 2 – 500 К

Выводы

1. Независимо от природы испаряемой жидкости, по мере испарения капли скорость процесса непрерывно понижается от максимальной в исходном состоянии до минимальной, но не равной нулю из-за взрывного разрушения капли на конечной стадии испарения.

2. Для всех исследованных жидкостей с повышением температуры подложки продолжительность жизни капли и периоды полупревращения понижаются, а константы скоростей и молярные скорости их испарения возрастают.

3. Время жизни капли на перегретой поверхности твердого тела и скорости испарения жидкостей зависят от размера капли и поэтому не могут быть использованы в качестве их

сравнительной характеристики испаряемости.

4. Константа скорости испарения не зависит от размера капли, а определяется природой испаряемой жидкости и свойствами подложки (главным образом ее температурой, а также материалом и качеством поверхности), вследствие чего константа скорости испарения может служить достаточно корректной сравнительной характеристикой испаряемости однокомпонентных жидких систем. При этом ее можно использовать для сравнения испаряемости жидкостей при одной и той же температуре либо в одинаковом интервале температур нагрева подложки.

5. Энергия активации пленочного кипения жидкости зависит только от ее природы и поэтому расценивается как более перспективный сравнительный показатель испаряемости разных жидких сред. Его использование в этом качестве показало, что испаряемость тетрахлорметана в сфероидальном состоянии в 1,24 раза, а этилового спирта – в 1,67 раза выше, чем воды.

Список литературы

1. Селиванов С. Е. Кинетика испарения капель жидких топлив / С. Е. Селиванов, М. И. Кулик // Вестник ХНАДУ. – 2011. – Вып. 7. – С. 27–31.
Selivanov S. Ye. Kinetika isparennya kapel zhidkikh topliv (Kinetics of Evaporation of Liquid Fuel Droplets) / S. Ye. Selivanov, M. I. Kulik // Vestnik KHNADU. – 2011. – Vyp. 7. – S. 27–31.
2. Базаянц Г. В. Кинетические характеристики процесса испарения капель воды в сфероидальном состоянии / Г. В. Базаянц, В. Д. Доненко, О. Б. Калашникова // Вісті АДІ: Наук.-вироб. збірник // ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ. – Горлівка, 2012. – № 2 (15). – С. 290–297.
Bazayants G. V. Kineticheskiye kharakteristiki protsessha isparennya kapel vody v sferoidalnom sostoyanii (Kinetic Characteristics of Water Droplet Evaporation Process in Spheroidal State) / G. V. Bazayants, V. D. Donenko, O. B. Kalashnikova // Visti ADI: Nauk.-vyrob. zbirnyk // DVNZ "DonNTU" ADI. – Horlivka, 2012. – № 2 (15). – S. 290–297.
3. Основы физической химии. Теория и задачи: учебное пособие для вузов / В. В. Ерёмин, С. И. Картов, И. А. Успенская и др. – М.: Изд-во «Экзамен», 2005. – 480 с. (Серия «Классический университетский учебник»)
Osnovy fizicheskoy khimii. Teoriya i zadachi: uchebnoye posobiye dlya vuzov (Physical Chemistry Fundamentals. Theory and Problems: Coursebook) / V. V. Yereyin, S. I. Kartov, I. A. Uspenskaya i dr. – M.: Izd-vo "Ekzamen", 2005. – 480 s. (Seriya "Klassicheskii universitetskii uchebnyk").
4. Боришанский В. М. Теплоотдача к жидкости, свободно растекающейся по поверхности, нагретой выше температуры кипения / В. М. Боришанский // Теплообмен и гидродинамика в парогенераторах (двухфазный поток) // Тр. ЦКТИ. – Л., 1965. – Вып. 62. – С. 118–155.
Borishanskiy V. M. Teplootdacha k zhidkosti, svobodno rastekayushcheysya po poverkhnosti, nagretoy vyshe temperatury kipeniya (Heat Transfer to Liquid Spread Free Over a Surface Heated Above the Boiling Temperature) / V. M. Borishanskiy // Teploobmen i gidrodinamika v parogeneratorakh (dvukhfaznyi potok) // Tr. TSKTI. – L., 1965. – Vyp. 62. – S. 118–155.
5. О пленочном кипении жидкости в сфероидальном состоянии при свободном растекании по поверхности / В. М. Боришанский, К. М. Арефьев, И. И. Палеев, Р. Т. Тектилов // Теплообмен и гидродинамика в парогенераторах (двухфазный поток) // Тр. ЦКТИ. – Л., 1965. – Вып. 62. – С. 78–83.
O plenochnom kipenii zhidkosti v sferoidalnom sostoyanii pri svobodnom rastekanii po poverkhnosti (About Subcooled Film Boiling in Spheroidal State When Spreading Free Over a Surface) / V. M. Borishanskiy, K. M. Arefyev, I. I. Paleyev, R. T. Tekhtilov // Teploobmen i gidrodinamika v parogeneratorakh (dvukhfaznyi potok) // Tr. TSKTI. – L., 1965. – Vyp. 62. – S. 78–83.
6. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. – Л.: Химия, 1983. – 232 с.
Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin (Quick Reference of Physical and Chemical Values) / pod. red. A. A. Ravdelya i A. M. Ponomarevoy. – L.: Khimiya, 1983. – 232 s.
7. Гороновский И. Т. Краткий справочник по химии / И. Т. Гороновский, Ю. П. Назаренко, Е. Ф. Некряч; под ред. А. Т. Пилипенко. – Изд. 5-е, испр. и перераб. – К.: Наукова думка, 1987. – 829 с.
Goronovskiy I. T. Kratkiy spravochnik po khimii (Chemistry Quick Reference) / I. T. Goronovskiy, Yu. P. Nazarenko, Ye. F. Nekryach; pod. red. A. T. Pilipenko. – Izd. 5-ye, ispr. i pererab. – K.: Naukova dumka, 1987. – 829 s.
8. Химический энциклопедический словарь / под. ред. И. Л. Кнунянца. – М.: Советская энциклопедия, 1983. – 792 с.

Khimicheskii entsiklopedicheskiy slovar (Encyclopedia of Chemistry) / pod red. I. L. Knunyantsa. – M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1983. – 792 s.

9. Химическая энциклопедия: в 5 томах / под. ред. Н. Л. Кнунянца. – М.: Советская энциклопедия, 1988.

Т. 1. – 1988. – 623 с.

Т. 2. – 1988. – 671 с.

Khimicheskaya entsiklopediya: v 5 tomakh (Encyclopedia of Chemistry: in 5 Volumes) / pod. red. N. L. Knunyantsa. – M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1988.

Т. 1. – 1988. – 623 s.

Т. 2. – 1988. – 671 s.

10. Энциклопедия неорганических материалов: в 2 томах / под. ред. Н. М. Федорченко. – К.: гл. редакция Украинской советской энциклопедии, 1977.

Т. 1. – 1977. – 840 с.

Т. 2. – 1977. – 813 с.

Entsiklopediya neorganicheskikh materialov: v 2 tomakh (Encyclopedia of Non-Organic Materials: in 2 Volumes) / pod. red. N. M. Fedorchenko. – K.: gl. redaktsiya Ukrainskoy sovetskoy entsiklopedii, 1977.

Т. 1. – 1977. – 840 s.

Т. 2. – 1977. – 813 s.

11. Аналитическая химия: проблемы и подходы: в 2-х томах / под ред. Р. Кельнера, Ж.-М. Мериме, М. Отто и Г. М. Видмер; пер. с англ. – М.: Мир, АТС, 2004. – 608 с.

Analiticheskaya khimiya: problemy i podkhody: v 2-kh tomakh (Analytical Chemistry: Problems and Approaches: in 2 Volumes) / pod red. R. Kelner, J.-M. Merime, M. Otto and G. M. Vidmer; per s angl. – M.: Mir, ATS, 2004. – 608 s.

12. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод: підручник для вищих закладів освіти / за загальною ред. А. К. Запольського. – К.: Лібра, 2000. – 547 с.

Fizyko-khimichni osnovy tekhnologii ochyshchennia stichnykh vod: pidruchnyk dlia vyshchych zakladiv osvity (Physical and Chemical Basics of Waste Water Treatment Technology: Coursebook) / za zagalnoiu red. A. K. Zapolskoho. – K.: Libra, 2000. – 547 s.

13. Плетнева Н. А. Физико-химические исследования охлаждающей способности жидкостей при резании металлов / Н. А. Плетнева, П. А. Ребиндер. – М.: ОТН АН СССР, 1946. – № 2. – 16 с.

Pletneva N. A. Fiziko-khimicheskiye issledovaniya okhlazhdayushchey sposobnosti zhidkostey pri rezanii metallov (Physical and Chemical Studies on Cooling Capacity of Liquids When Cutting Metal) / N. A. Pletneva, P. A. Rebinder. – M.: OTN AN SSSR, 1946. – № 2. – 16 s.

14. Плетнева Н. А. Закономерности испарения капель жидкости в сферoidalном состоянии (I). Влияние поверхностно-активных веществ на испарение капель в сферoidalном состоянии (II) / Н. А. Плетнева, П. А. Ребиндер. – М.: ЖФР, 1946. – Т. 20. – № 9.

Pletneva N. A. Zakonomernosti ispareniya kapel zhidkosti v sferoidalnom sostoyanii (I). Vliyaniye poverkhnostno-aktivnykh veshstv na ispareniye v sferoidalnom sostoyanii (II) (Liquid Droplet Evaporation Regularities in Spheroidal State (I). Effect of Surface-Active Materials on Evaporation in Spheroidal State (II) / N. A. Pletneva, P. A. Rebinder. – M.: ZhFR, 1946. – T. 20. – № 9.

15. Кремнев С. А. О взаимодействии водяных сфероидов с нагретыми поверхностями / С. А. Кремнев, А. Л. Сатановский. – Л., Труды ЦКТИ. – Вып. 62. – 1965.

Kremnev S. A. O vzaimodeystvii vodyanykh sferoidov s nagretyimi poverkhnostyami (Concerning the Interaction of Water Spheroids with Heated Surfaces) / S. A. Kremnev, A. L. Satanovskiy. – L., Trudy TSKTI. – Vyp. 62. – 1965.

Рецензент: канд. хім. наук, доц. А. П. Карпинець, АДІ ДонНТУ
Стаття надійшла до редакції: 08.11.2013