

**Вербінська Г.М., Британ А.В., Карбовський В.Л., Клецонок Т.В.**

*Київський національний університет ім. Тараса Шевченка,  
фізичний факультет, пр. Глушкова 4-б, Київ, 03022, Україна  
E-mail: [a\\_britan@ukr.net](mailto:a_britan@ukr.net)*

### **Випаровування крапель води та нітробензолу під дією ультрафіолетового опромінення**

*Запропонована методика вимірювання швидкості випаровування підвішених крапель рідин під впливом оптичного опромінення та наведено експериментальні дані по швидкості випаровування крапель води та нітробензолу в широкому інтервалі тисків 750 - 20 мм. рт. ст. в атмосфері сухого азоту при значенні температури суміші 20 °С для двох режимів випаровування (темного та під дією ультрафіолетового опромінення). Точність вимірювання температури краплі в процесі випаровування складає 0.03 °С. Експериментально виявлено зростання швидкості випаровування крапель води під впливом опромінення до 25%, та нітробензолу до 40 % причому швидкість випаровування зростає тим більше, чим менше тиск оточуючого середовища. Висока точність вимірювання температури краплі під час випаровування дозволяє стверджувати, що це явище не пов'язано із зміною температури краплі.*

Випаровування та ріст крапель є важливою і актуальною проблемою фізичної кінетики, а також прикладної фізики, у зв'язку із застосуванням цих процесів в сучасних технологіях та їх роллю в екологічних питаннях. Випаровування широко використовується для очистки речовин, сушки матеріалів, розділення рідких сумішей, кондиціонування повітря, тощо. На швидкість випаровування крапель впливає цілий ряд факторів: температура та тиск оточуючого середовища, вологість атмосферного газу, оптичне опромінення, присутність домішок в атмосфері [1] та ін. Вивченню впливу цих факторів на швидкість випаровування крапель присвячено значна кількість робіт [2-4], в тому числі і дослідження випаровування крапель води під дією потужного інфрачервоного лазерного опромінення [5]. При цьому зміна швидкості випаровування пов'язана перш за все з нагрівом краплі в результаті поглинання енергії краплиною. Дана робота присвячена дослідженню процесів випаровування підвішених водяних крапель розміром 1-2 мм під дією малопотужного ультрафіолетового опромінення, яке не викликає зміни температури краплі. Для цього необхідно створити умови для дуже точного вимірювання температури краплини в процесі її випаровування і забезпечити якомога менші втрати на теплопровідність підвісу.

Під випаровуванням зазвичай розуміють пароутворення на вільній поверхні рідини в результаті теплового руху її молекул при температурі нижче точки кипіння, що відповідає тиску газу над вказаною поверхнею. При цьому молекули рідини, що мають достатню кінетичну енергію, вириваються з по-

верхнього шару рідини в газове середовище; частина з них після зіткнення з молекулами газу повертається назад і або конденсується, або відбивається від поверхні рідини, інші – покидають поверхню назавжди. Випаровування – ендотермічний процес, при якому поглинається теплота, що витрачається на подолання сил взаємодії молекул у рідкій фазі і на роботу розширення при перетворенні рідини в пар. Тому температура краплини в процесі випаровування зменшується. Швидкість випаровування визначається поверхневою густиною потоку пари, проникаючої за одиницю часу в газове середовище з одиниці поверхні рідини. Найбільше значення швидкість випаровування набуває в вакуумі і визначається формулою Герца-Кнудсена:

$$I_m = \frac{dm}{dt} = \Omega \frac{\bar{v}}{4} C_0 \left[ \frac{e}{c} \right] \quad (1)$$

де  $\bar{v} = \sqrt{(8RT/\pi M)}$  - середня арифметична швидкість молекул,  $\Omega = 4\pi r^2$  - площа поверхні краплі,  $C_0$  - рівноважна концентрація молекул пари, що відповідає температурі  $T_0$  поверхні краплі ( $\text{г/см}^3$ ). При наявності над рідиною газового середовища швидкість випаровування сповільнюється тому, що швидкість віддалення молекул пари від поверхні рідини в газове середовище є значно меншою, ніж швидкість їх випаровування рідиною. При цьому біля поверхні розділу фаз утворюється шар парогазової суміші, практично насиченої паром. Вважаємо, що парціальний тиск і концентрація пари у поверхні рідини відповідають їх значенням для насиченої пари, що має температуру поверхні рідини. Якщо крапля рідини і парогазова суміш навколо неї нерухомі, впливом вільної конвекції можна знехтувати, тоді віддалення пари від поверхні рідини в газове середовище відбувається в основному в результаті дифузії (дифузійний режим випаровування). Швидкість випаровування в цьому випадку визначається за формулою Максвелла [5]:

$$I_m = \frac{dm}{dt} = 4\pi D r (C_0 - C_\infty), \quad (2)$$

яку зручно представити у вигляді

$$\frac{dS}{dt} = \frac{8\pi D (C_0 - C_\infty)}{\rho} \quad (3)$$

оскільки зміна площі поверхні краплі з часом є лінійною функцією.  $D$  – коефіцієнт взаємодифузії парогазової суміші,  $C_\infty$  – концентрація пари на нескінченній відстані від краплі.

Вимірювання швидкості випаровування краплі проводились в широкому діапазоні тисків від атмосферного 760 мм рт. ст. до 5 мм рт. ст. При цьому необхідно враховувати поправку на стрибок концентрації біля поверхні краплі, так звану поправку Фукса  $\Phi = \left( \frac{D}{r u \alpha} + 1 \right)^{-1}$ , де  $r$  – радіус краплини, що

випаровується,  $u = \bar{v} / 4$ ,  $\alpha$  – коефіцієнт конденсації рідини. В результаті формула (3) приймає вигляд

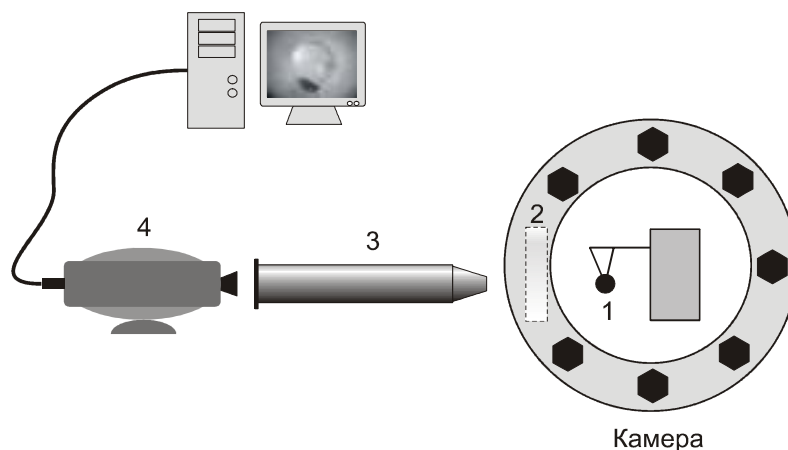
$$\frac{dS}{dt} = \frac{8\pi D(C_0 - C_\infty)}{\rho \left( \frac{D}{r\mu\alpha} + 1 \right)}, \quad (4)$$

що дозволяє з експериментальних значень швидкості зміни площі краплі з часом  $dS/dt$  одержати значення коефіцієнта випаровування  $\alpha$  для досліджуваної рідини.

**Методика вимірювання швидкості випаровування крапель.** Для дослідження швидкості випаровування крапель використовувалась установка, схема якої наведена на рис. 1

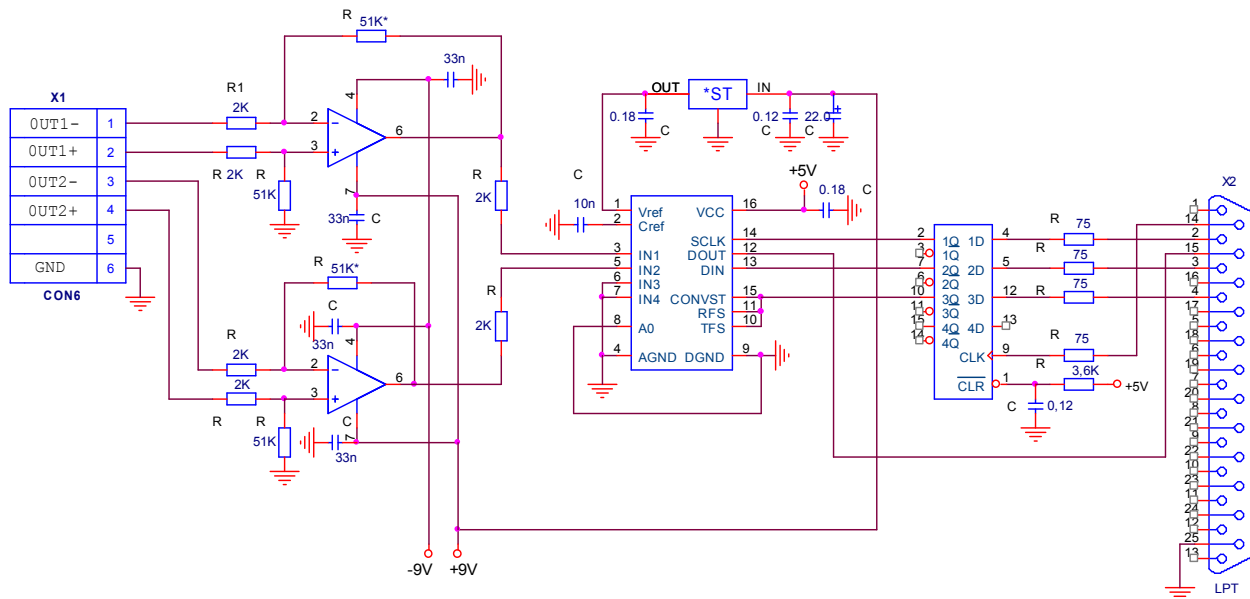
Камера (2), в якій проводиться дослідження випаровування підвішених краплин (1) має вигляд горизонтально розташованого циліндра об'ємом 20 л з подвійними стінками між, якими пропускається термостатуюча рідина. Термостат підтримує температуру в камері з точністю  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  в діапазоні  $5^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ . Температура в камері контролюється за допомогою температурного датчика. В якості датчика використовується р-п перехід безкорпусного транзистору. Це дозволило значно зменшити інерційність системи контролю температури. Електронна система дозволяє вимірювати температуру з точністю  $\pm 0,03^\circ\text{C}$ . Другий подібний датчик контролює температуру краплі. Для кращого контакту з рідиною датчик також використовується в якості підвісу для краплі. Використання р-п переходу безкорпусного транзистору одночасно в якості підвісу і датчика температури дозволило значно зменшити теплопровідність через підвіс і максимально наблизитись до умов випаровування вільної краплини.

Для вимірювання випаровування крапель в широкому діапазоні тисків (від нормального до 3-5 мм рт. ст.) до камери підключений спеціальний вакуумний прилад, що дозволяє отримувати в камері низькі тиски. Тиск в камері вимірюється ртутним U-образним манометром і контролюється електронним приладом. Висока герметичність камери дозволяє проводити вимірювання при сталому тиску протягом великого проміжку часу.



**Рис.1** Схема експериментальної установки для вимірювання швидкості випаровування крапель рідин.





**Рис.3.** Принципова електрична схема вузла АЦП з інтерфейсом зв'язку з персональним комп'ютером

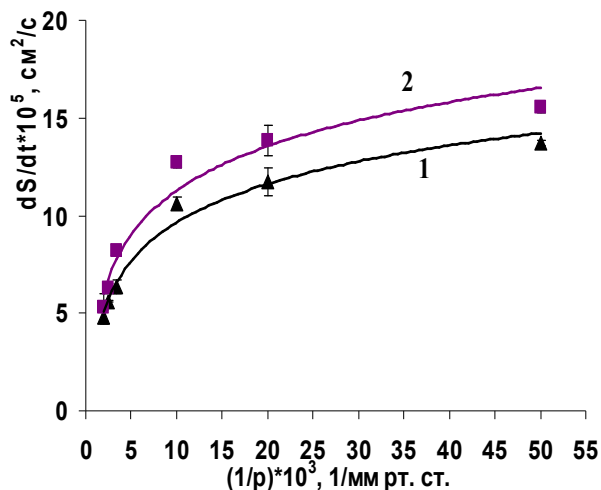
дена залежність спадання напруги на р-п переході кремнієвого транзистора від температури при протіканні через нього фіксованого прямого струму. Воно лінійно зменшується на 2...2,5мВ із кожним градусом приросту температури.

Струм датчика D1 стабілізований транзистором T1, що працює в термостабільній точці вихідної характеристики. Струм стабілізації встановлюється резистором R1. Аналогічним чином транзистором T3 стабілізований струм у ланцюзі формування зразкової напруги. Обидва транзистора мікросхеми A1 знаходяться на одному напівпровідниковому кристалі. У результаті прийнятих цих мір показання температури приладом залежить тільки від температури датчика.

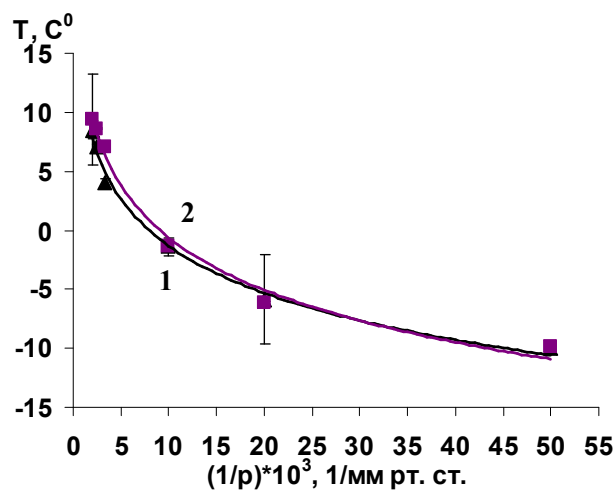
На транзисторі T2 і стабілітроні V1 зібраний стабілізатор напруги живлення схеми термодатчиків. Струм стоку транзистора T1 залишається рівним приблизно 3,5 мА при зміні напруги живлення в інтервалі 8...12В, це додатково поліпшує стабільність вихідної напруги стабілізатора і показань приладу.

**Плати АЦП і інтерфейс зв'язку з персональним комп'ютером.** Принципова електрична схема плати АЦП і інтерфейсу зв'язку з персональним комп'ютером показана на рис.3.

Сигнали з вузла термодатчиків надходять на два масштабних підсилювачі A1 і A2, що служать для калібрування шкали температур. З масштабних підсилювачів сигнали надходять на два входи АЦП A5 для оцифровки. З АЦП оцифровані сигнали через керуючий буфер A7 подаються на LPT порт персонального комп'ютера. На A3, A4 зроблені буферні підсилювачі для підключення зовнішніх пристроїв контролю температур. Резистори R\* і R\*\* служать для калібрування шкали температур зовнішніх пристроїв контролю. На мікросхемі A6 зроблений ІОН для АЦП.



**Рис.4** Залежність швидкості випаровування крапель води в атмосфері сухого азоту при  $T_0=20^\circ\text{C}$  від оберненого тиску в темновому режимі (1) та при ультрафіолетовому опроміненні (2).



**Рис.5** Залежність температури  $T_k$  крапель води від оберненого тиску під час стаціонарного процесу випаровування в темновому режимі(1) та при ультрафіолетовому опроміненні (2).

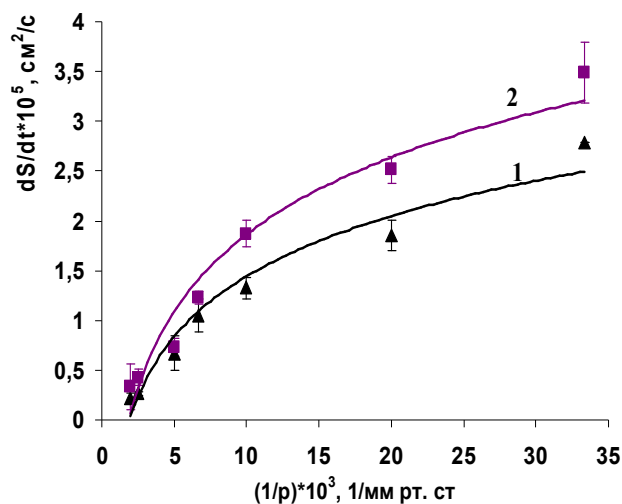
### Експериментальні результати

В експериментах по випаровуванню крапель води, підвішених на підвісі в камері з фіксованим значенням тиску в ній, визначались з певним часовим кроком площа поверхні краплини  $S$ , її температура  $T_k$  і температура оточуючого середовища  $T_0$ . За кутом нахилу прямолінійної залежності площі поверхні краплини від часу  $S=S(t)$  розраховувалась швидкість випаровування  $dS/dt$ . Випаровування крапель води відбувалось в атмосфері сухого азоту, отже у формулі (4) величина  $C_\infty = 0$ .

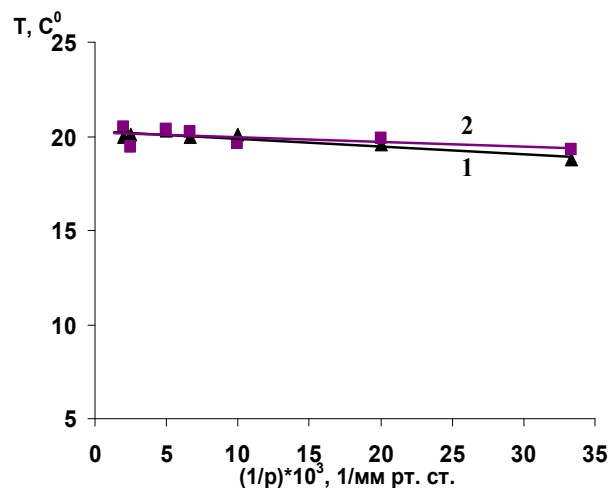
Експериментальні дані по швидкості випаровування крапель води в атмосфері сухого азоту при температурі  $20^\circ\text{C}$  в широкому діапазоні тисків (від 750 мм до 20 мм рт. ст.) при оптичному опроміненні та у відсутності опромінення (темновий режим) наведені на рис.4.

Малопотужне джерело ультрафіолетового випромінювання (лазерний діод потужністю 3.5 Вт) з довжиною хвилі 390 нм встановлювалось на відстані 2.5 см від краплі. Таким чином, опромінювались і крапля і оточуюче паро-газове середовище. Як видно з рис.4, спостерігається помітне збільшення швидкості випаровування крапель води при опроміненні у порівнянні з темновим режимом. Причому зростання швидкості випаровування при опроміненні тим більше, чим менше тиск оточуючого середовища.

Узгодження теоретичної кривої  $dS/dt$  з отриманою експериментально згідно формули (4) проводилась шляхом підгонки одного параметру – коефіцієнта конденсації  $\alpha$ . Одержані значення коефіцієнту конденсації в режимі без освітлення і при ультрафіолетовому опроміненні складають, відповідно,  $\alpha=0.0017$  та  $\alpha=0.002$ .



**Рис.6** Залежність швидкості випаровування крапель нітробензолу в атмосфері сухого азоту при 20°C від оберненого тиску в темновому режимі (1) та при ультрафіолетовому опроміненні (2).



**Рис. 7** Залежність температури  $T_k$  крапель нітробензолу від оберненого тиску під час стаціонарного процесу випаровування в темновому режимі (1) та при ультрафіолетовому опроміненні (2).

В процесі експерименту вимірювались також залежності температури краплі від часу при сталому значенні тиску оточуючого середовища. На рис. 5 представлені залежності температури від оберненого тиску  $T=f(1/p)$ , що були отримані при освітленні та в темновому режимах. Як видно з рис.5, температури крапель води в обох режимах практично не відрізняються. Різниця температур для певного значення тиску не перевищує  $1^\circ-2^\circ C$ . В той же час швидкості випаровування крапель води при опроміненні зростає до 25% при найменших значеннях тиску.

Крім води вплив ультрафіолетового опромінювання досліджувався для випадку випаровування крапель нітробензолу (рис. 6, 7). Аналіз наведених графіків вказує на аналогічне збільшення швидкості випаровування нітробензолу під час ультрафіолетового опромінення до 40% при малих значеннях тиску (рис. 6), при незначній різниці в значеннях температури краплі в обох режимах. Одержані шляхом апроксимації експериментальних даних формулою (4) значення коефіцієнта конденсації становлять відповідно 0.006 та 0.0055.

Отже, експериментально встановлено зростання швидкості випаровування крапель досліджуваних рідин під дією ультрафіолетового опромінення, не пов'язане з нагріванням їх поверхні. Очевидно, повинен існувати механізм захоплення і накопичення енергії молекулами води, що призводить до даного ефекту. Згідно з умовами експерименту крапля води знаходилась в атмосфері азоту, молекули якого не мають дипольного моменту і не можуть поглинати електромагнітне випромінювання. Таким чином, можна вважати, що з електромагнітним випромінюванням взаємодіяли лише молекули води в газопаровій фазі. Поглинанням випромінювання самою краплиною можна

знехтувати, оскільки експериментально не встановлено її нагрівання, що можна пояснити малою інтенсивністю джерела в даному експерименті та відносно невеликими розмірами краплі. На наш погляд, над поверхнею краплини під дією малопотужного електромагнітного опромінення утворюються два сорти молекул води – у збудженому та не збудженому станах. Зростання швидкості випаровування визначається концентрацією збуджених молекул рідини в парогазовому середовищі. Збуджені молекули разом з незбудженими молекулами конденсуються на поверхні краплини та проводять там деякий час. Практично всі збуджені молекули будуть покидати поверхню краплини не з тепловою швидкістю, а з дещо більшою, яка визначається за законом збереження енергії. Це приводить до збільшення швидкості випаровування краплин, особливо при зменшенні тиску, оскільки концентрація молекул газу стає значно меншою у парогазовому середовищі.

В попередніх наших експериментах [2] джерелом опромінення була галогенова лампа з широким спектром, близьким до спектру абсолютно чорного тіла. Збільшення швидкості випаровування для води та нітробензолу складало, відповідно, 12% та 22%. Використання монохроматичного джерела опромінення з довжиною хвилі 390 нм привело до зростання швидкості випаровування порівняно з темновим режимом до 25% для води та 40% для нітробензолу. Отже, швидкість випаровування крапель суттєво залежить від частоти опромінення. Можна провести певну аналогію між даним експериментальним фактом та явищем фотоефекту в металах.

### **Висновки**

1. Експериментально встановлено збільшення швидкості випаровування підвішених крапель води ( до 25%) та нітробензолу (до 40%) під впливом малопотужного ультрафіолетового опромінення в атмосфері сухого азоту в широкому діапазоні тисків оточуючого середовища від атмосферного до 20 мм рт.ст. Найбільше зростання швидкості випаровування спостерігалось при найменшому значенні тиску.
2. Завдяки створенню умов для високоточного вимірювання температури краплини під час її випаровування встановлено, що температура краплі при опроміненні та у його відсутності практично не змінюється. Нагрівання не може бути причиною зростання швидкості випаровування при освітленні краплини.
3. Одержані експериментальні факти дозволили висунути гіпотезу, що інтенсивність випаровування крапель полярних рідин пов'язана з концентрацією збуджених під впливом електромагнітного випромінювання молекул пари в газовому середовищі. Процес випаровування крапель рідин під впливом ультрафіолетового опромінення може слугувати аналогом явища фотоефекту в металах.



## Література:

1. Булавін Л.А., Вербінська Г.М., Нужний В.М. Кінетика випаровування крапель рідин в паро-газовому середовищі. – Київ, ВЦ Київський університет”, 2003. – с.
2. Вербінська Г.М., Загородня О.А. Вплив зовнішніх умов на швидкість випаровування крапель рідин // Сучасні проблеми молекулярної фізики. – К.: ВЦП «Київський ун-т», 2006. – С. 169 – 180.
3. Verbinska G.M., Mal'nev V.N., Nuzhnyi V.M., Zagorodnya O.A. Evaporation of droplets of water and ice in atmosphere of dry nitrogen containing vapor of Freon-113 and nonane // J. Mol. Liquids, 120, 2005. - P. 87-89.
4. Verbinska, G.M. Mal'nev V.N., Nuzhnyi V.M., Zagorodnya O.A. Peculiarities of water droplets evaporation at a constant temperature // Ukr. J. Phys. – 2009. – vol.48, 39. – P. 944-949.
5. Тригуб В. И. Испарение капель воды миллиметрового диапазона размеров в поле излучения инфракрасного // Журнал технической физики. – 2006. – Т. 76, № 4. – С.120-123.

**Вербинская Г.М., Британ А.В., Карбовский В.Л., Клецонок Т.В.**

### **Испарение капель воды и нитробензола под действием ультрафиолетового облучения**

#### АННОТАЦИЯ

*Предложена методика измерения скорости испарения подвешенных капель жидкостей под действием ультрафиолетового излучения, а также представлены экспериментальные данные по скорости испарения капель воды и нитробензола в широком интервале давлений 750-20 мм. рт. ст в атмосфере сухого азота при значении температуры смеси 20 °С для двух режимов испарения (темнового и под действием ультрафиолетового облучения). Точность измерения температуры в процессе испарения составляет 0.03 °С. Экспериментально обнаружено возрастание скорости испарения воды по действием облучения до 25 % и нитробензол до 40% при уменьшении давления. Высокая точность измерения температуры капли во время испарения позволяет утверждать, что это явление не связано с изменением температуры капли.*

**Water and nitrobenzene droplets evaporation under ultraviolet irradiation**

SUMMARY

*The experimental method of the liquid droplets evaporation speed measurements for the case of ultraviolet irradiation influence is proposed. The experimental data according water and nitrobenzene droplet evaporation into gas-vapor mixture of dry nitrogen and droplets vapor were considered for wide pressure interval (from 750 down to 20 mmHg). The experiments were carried out for mixture temperature 20 °C for two regimes (not including ultraviolet irradiation and with it). The received data dependences show the increase of evaporation speed under ultraviolet irradiation (about 25 % for water and 40% for nitrobenzene), especially for low pressure. The high accuracy of temperature's measurements (actually about 0,03 °C) allows concluding that this phenomena is not stipulated by the droplet temperature change.*