

Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева

A.A. Хащенко¹, O.B. Вечер², E.I. Дискаева²

¹ Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Россия)

² Ставропольский государственный медицинский университет (Ставрополь, Россия)

A Study of Temperature Dependence of Evaporation Rate of Liquids from a Free Surface and Liquid Boiling Rate on a Solid Heating Surface

A.A. Haschenko¹, O.V. Vecher², E.I. Diskaeva²

¹ North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russia)

² Stavropol State Medical University (Stavropol, Russia)

Процесс испарения жидкости рассматривается с позиций теории трансляционного движения. Предполагается, что колебательные процессы молекул в жидкости, как и в кристаллах, состоят в отклонениях их от положения равновесия. В жидком состоянии данные положения молекул изменяются во времени, и в случае когда рядом с молекулой имеется молекулярных размеров полость, может происходить скачкообразный переход молекулы жидкости из одного положения равновесия в другое. В предположении, что с увеличением температуры жидкости время устойчивого состояния молекул будет уменьшаться, частота перескоков будет увеличиваться и вероятность выхода молекулы со свободной поверхности жидкости в область газового пространства также растет, сделан вывод о том, что с увеличением температуры будет возрастать и скорость испарения жидкости. На основании сделанных предположений получены теоретические зависимости, позволяющие рассчитать скорость испарения жидкости с ее свободной поверхности в широком интервале температур — от температуры кристаллизации до температуры кипения. Также изучен характер температурной зависимости скорости испарения жидкости с твердой поверхности нагрева в режиме насыщенного пузырькового кипения.

Ключевые слова: трансляционное движение, скорость испарения, энергия активации, работа выхода, удельная теплота парообразования, температурный напор.

In this paper, the process of liquid evaporation is considered from the standpoint of the translational motion theory. It is assumed that the oscillation process in molecules of liquid as in crystals consists of fluctuations from equilibrium positions. In the liquid state, positions of the molecules vary with time, and in case of molecular-sized cavity near a molecule there can be an abrupt transition of the liquid molecule from one equilibrium position to another. An assumption has been made that liquid temperature increase during steady-state condition of molecules will result in decrease of steady-state duration time, jump frequency will be increased, and probability of molecule transition from free surface of liquid to the vapor space will also be increased. Hence, it is concluded that temperature increase will cause the increase of liquid evaporation rate. In accordance with the assumptions theoretical dependencies are elaborated for calculation of liquid evaporation rate on its free surface for a wide range of temperatures — from freezing point to boiling point. Also, the nature of temperature dependence of liquid evaporation rate on a solid heating surface during saturated bubble boiling is investigated.

Key words: translational motion, evaporation rate, activation energy, work function, specific heat of vaporization, temperature difference.

Вопросам, связанным с испарением жидкости с поверхности нагрева и со свободной поверхности, посвящено большое число исследований, что связано как с практической важностью данного направления теплофизики, так и с достаточно давней его историей. За время изучения вопроса об испарении жидкости при ее кипении приоритетными становились различные направления: определение температуры зеркала испарения, влияние тонких пленок и поверхностно-активных веществ на скорость испарения со свободных поверхностей жидкости и др. [1].

Одна из основных черт современного этапа исследования механизма пузырькового кипения как отечественными, так и зарубежными учеными, заключается во все большей дифференциации тематики исследований, изучении в «чистом виде» отдельных сторон этого сложного явления [2, 3]. Подавляющее число исследований посвящено изучению новых эффектов и ранее неизвестных деталей, характеризующих процесс испарения при кипении жидкости на различных поверхностях нагрева. Некоторое промежуточное положение между этим направлением углубленного изучения деталей и традиционным путем чисто эмпирических корреляций и обобщений занимает относительно небольшая группа работ, в основном качественного плана, в которых обсуждаются возможные модели процесса пузырькового кипения [4].

Испарение жидкости является важнейшим технологическим процессом, играющим ведущую роль в самых разнообразных отраслях промышленности, таких как производство энергии, металлургия, гидрология и т. д. В связи с этим продолжение исследований особенностей его протекания представляется актуальным и интересным как с практической, так и с теоретической точек зрения.

Данное исследование ставило перед собой цель проанализировать с точки зрения теории трансляционного движения процесс испарения жидкости как со свободной поверхности, так и с поверхности нагрева, для получения теоретических зависимостей, позволяющих рассчитать данные величины в широком интервале температур. Для изучения был выбран пузырьковый режим кипения, поскольку он соответствует самым высоким скоростям испарения жидкости [5].

Известно, что колебательные процессы молекул в жидкости, как и в кристаллах, состоят в отклонениях их от положения равновесия. В жидком состоянии, в отличие от твердого, данные положения молекул не фиксированы, а изменяются во времени. Если по соседству с молекулой имеется полость молекулярных размеров, то происходит переход молекулы с одного положения равновесия в другое, осуществляющийся скачкообразно [6].

Данное скачкообразное перемещение называется трансляционным движением. Из теории трансляци-

онного движения, разработанной Я.И. Френкелем [7], следует, что время τ «оседлого» пребывания молекул вблизи некоторого положения равновесия определяется уравнением

$$\tau = \tau_0 e^{E_0/kT}, \quad (1)$$

где τ_0 — период колебаний молекул.

Очевидно, что выражение для частоты перескоков молекул можно записать в виде

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0 e^{E_0/kT}} = f_0 e^{-E_0/kT}, \quad (2)$$

где $f_0 = \frac{1}{\tau_0}$.

Из уравнений (1) и (2) следует, что с увеличением температуры жидкости время «оседлого» состояния молекул будет уменьшаться, а частота f перескоков будет увеличиваться, следовательно, в силу вероятности перескока молекул в любом из направлений, вероятность P выхода молекулы со свободной поверхности жидкости в область газового пространства можно представить в виде

$$P = \frac{f}{f_0} = \frac{1}{e^{E_0/kT}} = e^{-E_0/kT}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что при $T \rightarrow 0$ и $T \rightarrow \infty$ вероятность P будет изменяться в пределах $0 \leq P \leq 1$. Следовательно, с увеличением температуры будет возрастать и скорость испарения жидкости.

На основании рассуждений, проведенных выше, можно полагать, что скорость испарения $v(T)$ будет пропорциональна вероятности выхода молекул из жидкости в газовое пространство, и, следовательно, на основе указанной пропорциональности можно записать следующее соотношение [8, 9]:

$$\frac{v(T_0)}{v(T)} = \frac{e^{-E_0/kT_0}}{e^{-E_0/kT}}, \quad (4)$$

где T_0 — температура жидкости, соответствующая точке ее замерзания.

Обозначив скорость испарения $v(T_0)$ через v_{s0} и разрешив соотношение (4) относительно $v(T)$, получим выражение, с помощью которого можно определить скорость испарения жидкости с ее зеркальной поверхности:

$$v(T) = v_s = v_{s0} e^{\frac{E_0(T-T_0)}{kT_0 T}}. \quad (5)$$

Так как масса одной молекулы равна

$$m_0 = \frac{\mu}{N_a},$$

то число молекул в единице массы будет равно

$$n_0 = \frac{N_a}{\mu}.$$

Тогда по значению удельной теплоты парообразования L значение энергии активации можно определить следующим выражением:

$$E = \frac{L\mu}{N_a}. \quad (6)$$

Подставив уравнение (6) в уравнение (5), получим:

$$v_3 = v_{30} \cdot e^{\frac{L\mu(T-T_0)}{kN_aT_0T}}. \quad (7)$$

Поскольку $k \cdot N_a = R$, следовательно, последнее уравнение можно представить в виде:

$$v_3 = v_{30} \cdot e^{\frac{L\mu(T-T_0)}{RT_0T}}. \quad (8)$$

При температуре кипения жидкости $T = T_s$ скорость испарения стабилизируется и принимает в неогретой системе свое максимальное значение:

$$v_{3\max} = v_{3s} = v_{30} \cdot e^{\frac{L\mu(T_s-T_0)}{RT_0T_s}}. \quad (9)$$

При достижении жидкостью температуры ее кипения $T = T_s$ в системе создаются условия для возникновения перегретой жидкости. По мере увеличения температурного напора $\Delta T = T - T_s$ начинается процесс парообразования на поверхности нагрева, и в этом случае можно говорить о скорости испарения с поверхности нагрева. Поверхность нагрева посредством действующих центров кипения становится генератором пара.

В данном случае энергия активации, необходимая для удаления молекулы жидкости от поверхности нагрева E'_0 , будет отличаться от энергии активации на свободной поверхности жидкости E_0 и определяться выражением

$$E'_0 = CE_0 = \frac{CLN_a}{\mu}, \quad (10)$$

где $C = const$, зависящая от природы жидкости.

Для скорости испарения с поверхности нагрева можно записать следующее соотношение:

$$\frac{v(T_s)}{v(T_\omega)} = \frac{e^{-E'_0/kT_s}}{e^{-E'_0/kT_\omega}} = \frac{e^{-CE_0/kT_s}}{e^{-CE_0/kT_\omega}}, \quad (11)$$

где $v(T_s)$ — скорость испарения с поверхности нагрева при $T = T_s$, $v(T_\omega)$ — скорость испарения с поверхности нагрева при $T = T_\omega$.

Из соотношения (11) следует, что скорость испарения жидкости с поверхности нагрева при $T_\omega \geq T_s$ будет определяться выражением:

$$v_{\omega s} = v(T_\omega) = v(T_s) \cdot e^{\frac{E_0(T_\omega - T_s)}{kT_\omega T_s}}. \quad (12)$$

Окончательное выражение будет иметь вид:

$$v_{\omega s} = v_{\omega s0} \cdot e^{\frac{CL\mu\Delta T}{RT_\omega T_s}} = v_{30} \cdot e^{\frac{L\mu(T_s - T_0)}{RT_0 T_s}} \cdot e^{\frac{CL\mu\Delta T}{RT_\omega T_s}}, \quad (13)$$

где $v_{\omega s0} = v(T_s)$ — скорость генерации пара при

$$T = T_s.$$

Из уравнения (13) следует, что при $\Delta T = 0$:

$$v_{\omega s} = v_{\omega s0} = v_{30} \cdot e^{\frac{L\mu(T_s - T_0)}{RT_0 T_s}} = v_{3s}, \quad (14)$$

т. е. в данном случае скорость испарения с поверхности нагрева будет определяться как максимальная скорость испарения со свободной поверхности жидкости v_{3s} при ее температуре $T = T_s$. Общая скорость испарения с поверхности нагрева в режиме насыщенного пузырькового кипения $v_{\omega s}$ будет определяться как сумма скорости испарения со свободной (зеркальной) поверхности жидкости v_s и скорости генерации пара непосредственно с поверхности нагрева v_ω , т. е.

$$v_{\omega s} = v_s + v_\omega. \quad (15)$$

Отсюда следует, что

$$v_\omega = v_{\omega s} - v_s = v_{30} \cdot e^{\frac{L\mu(T_s - T_0)}{RT_0 T_s}} \cdot (e^{\frac{CL\mu\Delta T}{RT_\omega T_s}} - 1). \quad (16)$$

Из данного уравнения следует, что при $\Delta T = 0$, $v_\omega = 0$.

Таким образом, скорость испарения с поверхности нагрева в результате функционирования действующих центров кипения будет определяться выражением (13), а суммарная скорость испарения в режиме насыщенного пузырькового кипения — выражением (16).

Библиографический список

1. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассобмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск, 1984.
2. Qingqing Shen, Wensheng Lin, Anzhong GU, Yonglin JU. A simplified model of direct-contact heat transfer in desalination system utilizing LNG cold energy. Front. Energy. — 2012. — № 6 (2).
3. Amir Faghri, Yuwen Zhang, John Howell. Advanced Heat and Mass Transfer. — 2010.
4. Лабунцов Д.А. Физические основы энергетики: избранные статьи по теплообмену, гидродинамике и термодинамике. — М., 2000.
5. Анохина Е.В. Исследование процессов испарения и кипения жидкостей // ЖТФ. — 2010. — Т. 80. — Вып. 8.

6. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. — Л., 1975.

7. Кесслер Ю.М., Петренко В.Е., Лященко А.К. Вода: структура, состояние, сольватация. — М., 2003.

8. Марков И.И., Хащенко А.А., Вечер О.В. О скорости испарения жидкости с ее свободной поверхности и с поверхности нагрева // Сб. научн. тр. — Северо-Кавказское отделение технологических наук РФ. — 2002. — Вып. 6.

9. Хащенко А.А., Меньщиков А.В., Афанасьев М.А., Пуля А.В., Коробов А.Ю. Экспериментальное исследование процессов испарения и кипения жидкостей // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона : материалы VII Росс. науч.-практ. конф. — Ставрополь, 2012.