

УДК 53

DOI 10.21661/r-474510

Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПАКОВКИ ЖИДКОСТИ

Аннотация: на основании физической модели «распаковки» жидкости, опубликованной в 1983 году для объяснения физической природы поверхностного натяжения, предложено объяснение капиллярных явлений. Доказывается единая физическая природа процесса конденсации и процессов в капиллярах, выраженных через величину поверхностного натяжения жидкости. Для доказательства применимости модели «распаковки» для капиллярных явлений была теоретически выведена эмпирическая формула Борелли-Жюрена определения высоты поднятия жидкости в капиллярах в зависимости от величины поверхностного натяжения. Указаны допущения, при которых получена формула. Кроме того, в статье предлагается новая формула для определения максимальной высоты поднятия жидкости в капиллярах, в зависимости от критической температуры жидкости и молекулярной массы жидкости.

Ключевые слова: физика, модель, капилляр, явление, конденсация, испарение, поверхностное, натяжение, распаковка, взаимосвязь, зависимость, формула, Жюрен, Борелли.

G.G. Haydarov, A.G. Haydarov

REPRESENTATION OF CAPILLARY PHENOMENA FROM THE PHYSICAL MODEL OF UNPACKING A LIQUID

Abstract: based on the physical model of «unpacking» a fluid, published in 1983 to explain the physical nature of surface tension, an explanation of capillary phenomena was proposed. The unified physical nature of the condensation process and the processes in the capillaries expressed in terms of the surface tension of the liquid is proved. To prove the applicability of the «unpacking» model for capillary phenomena,

an empirical Borelli-Jurin formula for determining the height of fluid lifting in capillaries was theoretically derived depending on the magnitude of the surface tension. The assumptions under which the formula is obtained are indicated. In addition, the article proposes a new formula for determining the maximum height of liquid lift in the capillaries, depending on the critical temperature of the liquid and the molecular weight of the liquid.

Keywords: *physics, model, capillary, phenomena, condensation, evaporation, surface, tension, unpacking, correlation, dependence, formula, Jurin, Borelli.*

Анализ публикаций

В 1983 году была предложена единая концепция, объединяющая физические понятия испарения, внутренняя энергия, поверхностное натяжение [1]. Предложена виртуальную модель «запакованной» молекулы жидкости (по аналогии с шаром, запакованным внутри коробки). «Распаковка» («отрезание») молекул со всех шести сторон (перпендикулярно осям X, Y, Z) от других молекулы приводит к физическому понятию внутренней энергии и объяснению процесса испарения жидкости. «Распаковка» («отрезание») слоя молекул с одной стороны (по плоскости) приводит к физическому понятию поверхностного натяжения. Такая виртуальная модель позволила теоретически вывести формулу взаимосвязи энтальпии, внутренней энергии и поверхностного натяжения. Формула была проверена по справочным данным для 64 веществ в диапазоне температур от -253 до 200 градусов Цельсия. В популярном изложении данная гипотеза распаковки опубликована в 2010 году в статье [2], в википедии и викиучебнике на русском языке по теме «Поверхностное натяжение». Расширенное научное изложение гипотезы распаковки со следствиями было опубликовано в 2011 году [3; 4].

В 1985 году аналогичный взгляд на физическую природу поверхностного натяжения, как части внутренней энергии, при решении другой физической

задачи был опубликован В. Вайскопфом (Victor Frederick Weisskopf) в США [5; 6]. Однако расчетной формулы в данных статьях приведено не было.

Дальнейшее развитие гипотезы «распаковки» было применено для теоретического обоснования зависимости поверхностного натяжения от температуры в 2011 [7] и в 2012 [8] годах. Выведенная теоретическая формула хорошо согласуется как с эмпирическими данными, так и с известной классической эмпирической зависимостью – правилом Лоранда Этвёша (Loránd Eötvös rule) [9]. Применение концепции «распаковки» позволило: теоретически вывести значение эмпирического коэффициента пропорциональности для формулы Лоранда Этвёша и определить его физический смысл (чего не было получено ранее – при выводе этой формулы). А также дать ещё одно определение физического понятия давления как энергии, действующей на объём (мономолекулярного) поверхностного слоя и сформулировать допущения и области применения выведенной теоретической формулы.

Дальнейшее развитие понятия «распаковки» в 2016 году было применено для теоретического обоснования взаимосвязи температур плавления, кипения и критической температуры [10–12]. Для проверки такого использования гипотезы были использованы данные из справочников для 85 веществ, в пределах температур от 13 до 855 градусов Кельвина. Сравнение теоретических формул и экспериментальных данных проводилось по средним значениям. Для такой модели теоретически выведено, что температура плавления составляет $1/3$, а температура кипения от $1/2$ (для начала кипения) до $2/3$ (для интенсивного кипения) от критической температуры. В работе [13] была проведена еще одна проверка справедливости применения модели «распаковки». Проверка проводилась по справочным данным отношений температур плавления к температурам кипения для 98 простых веществ из периодической таблицы Д.И. Менделеева.

Цели статьи

В данной работе ставятся две цели.

Первая цель – применить модель «распаковки» для доказательства однозначной связи между процессом конденсации и капиллярными явлениями, выраженными через величину коэффициента поверхностного натяжения. Для доказательства разберем теоретический вывод известной эмпирической формулы Борелли-Жюрена для определения высоты поднятия жидкости в капиллярах.

Вторая цель – вывести теоретически новую формулу для определения высоты поднятия жидкости в капиллярах, в зависимости от критической температуры жидкости и молекулярной массы жидкости.

Изложение основного материала

Ранее из физической модели «распаковки» было доказано, что процесс испарения жидкости и явления дробления жидкости, выраженные через величину коэффициента поверхностного натяжения, имеют общую физическую природу. Рассмотрим процесс конденсации, как обратный процессу испарения. Рассмотрим также, в первом приближении, процесс проникновения молекул жидкости в капилляры с конденсацией жидкости внутри, как обратный дроблению жидкости. Оба последних процесса в физике принято выражать через величину коэффициента поверхностного натяжения. В таком случае можно использовать концепцию модели «распаковки». Для доказательства единой физической природы процесса конденсации и капиллярных явлений мы теоретически выведем эмпирическую формулу Борелли-Жюрена для определения высоты поднятия жидкости в капиллярах в зависимости от величины поверхностного натяжения.

Введем ряд допущений до вывода формулы. Рассмотрим идеальный случай смачивания стенок капилляров, не будем учитывать силы вязкостного трения при подъеме жидкости. Молекулы жидкости представим симметричными со сферической поверхностью. Допустим, что плотность парогазовой фазы пренебрежительно малы по сравнению с плотностью жидкости. Для вывода рассмотрим систему координат $(x, -x, y, -y, z, -z)$ с шестью направлениями осей.

Рассмотрим модель конденсации в капиллярах, как обратную модели испарению, описанную в модели «распаковки» [1–3]. Но при конденсации, в отличие

от испарения, молекулы будут не «распаковываться», а «упаковываться». Энергия при конденсации молекул будет выделяться (а не затрачивается, как при испарении молекул). Проведем дальнейшую аналогию. При попадании молекулы жидкости в очень узкий капилляр, сопоставимый с размером молекулы и при условии полного смачивания стенки получим эффект частичной «упаковки» молекулы. То есть молекула теряет способность передвигаться по четырем из шести направлений системы координат. С точки зрения изменения энергии молекулы данный эффект будет аналогичен конденсации, но не полной конденсации, как мы привыкли понимать этот термин. В узком капилляре молекула теряет $4/6$ от внутренней энергии. (Для сравнения, при полной конденсации было бы изменено $6/6$ внутренней энергии «упаковки»). А при полном испарении, как мы уже рассматривали в модели «распаковки» [1–3], соответственно изменяется $6/6$ внутренней энергии. Единственным отличием конденсации от испарения является направленность изменения внутренней энергии и соответственно знак изменения плюс или минус.

В капилляре изменение внутренней энергии жидкости (dU) может пойти на работу подъёма жидкости в капилляре (A). Запишем это высказывание с помощью известных в физике формул.

Работа для определения высоты подъёма жидкости в идеальном капилляре

$$A = m * g * H, \quad (1)$$

где A – работа по подъёму жидкости в капилляре, Дж;

m – масса жидкости, кг;

H – высота подъёма жидкости, м.

Масса молекулы в габаритном кубике «распаковки» [1] равна

$$m = \rho_0 * 8 * r^3, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность жидкости, кг/м³;

r – радиус молекулы, м.

Применим также ранее используемые в статьях [1–3] формулы для радиуса молекулы жидкости в габаритном кубике «распаковки»; боковой поверхности

габаритного кубика вокруг молекулы; массы, выраженной через объем габаритного кубика.

$$r = (M / (8 * N * \rho_0))^{1/3} \quad (3)$$

Где M – молекулярная масса, кг/кмоль;

N – число Авогадро, кмоль⁻¹;

ρ_0 – плотность жидкости, кг/ м³.

$$S = 4 * r^2, \quad (4)$$

где S – площадь боковой грани габаритного кубика, м².

Так как в капилляре движение жидкости ограничено по четырем направлениям, то изменение внутренней энергии равно

$$dU = 4 * S * \sigma, \quad (4)$$

где dU – изменение внутренней энергии в капилляре, Дж;

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/ м².

Приравняем работу по подъёму жидкости в капилляре к изменению внутренней энергии жидкости в капилляре.

$$A = dU. \quad (5)$$

То есть, после подстановки формул (1–4) в выражение (5) получим:

$$\rho_0 * 8 * r^3 * g * N = 4 * 4 * r^2 * \sigma \quad (6)$$

Или окончательно получаем

$$H = (2 * \sigma) / (r * \rho_0 * g), \quad (7)$$

Таким образом, мы теоретически вывели формулу Борелли-Жюрена для определения высоты поднятия жидкости в капиллярах при идеальном смачивании при идеальных условиях для случая, когда $\cos(\theta) = 1$ – косинус угла смачивания жидкостью стенки капилляра и когда плотность газовой фазы во много раз меньше плотности жидкости.

Из теоретического вывода формулы для идеальных условий мы получили важный вывод, что максимальная высота подъема жидкости не может превышать определенного значения. В эмпирической формуле Борелли-Жюрена максимальное значение высоты подъёма жидкости указано расплывчато, через

радиус капилляра. Можно только догадывается, чему будет равен радиус капилляра и как его измерять для малых капилляров.

В выведенной нами формуле (7) получено однозначное значение максимальной высоты подъема жидкости. Для этого достаточно в формулу (7) подставить радиус минимального капилляра, равного радиусу молекулы. Тогда формулу для максимальной высоты подъема жидкости можно преобразовать к виду

$$H_{\text{maximum}} = (4 * \text{Sigma} / g) * (N^{1/3} / (M^{1/3} * r_0^{2/3})), \quad (8)$$

Не всегда удобно применять формулы (7, 8) для определения максимальной высоты подъема жидкости, так как необходимо обязательно знать значение коэффициента поверхностного натяжения вещества. В работе [8] опубликована формула для связи значения коэффициента поверхностного натяжения вещества с критической температурой и с температурой вещества

$$\text{Sigma} = (r_0^{2/3} * R * (T_{\text{кр}} - T)) / (M^{2/3} * N^{1/3}), \quad (9)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж / (кмоль * К);

$T_{\text{кр}}$ – критическая температура, К;

T – температура, К.

Тогда из формулы (7) с учетом подстановки в нее формулы (9) получим новую формулу для высоты подъема жидкости

$$H = (2 * R * (T_{\text{кр}} - T)) / (r * g * r_0^{1/3} * M^{2/3} * N^{1/3}). \quad (10)$$

А для максимальной высоты подъема жидкости после подстановки в формулу (8) формулы (9) получим

$$H_{\text{maximum}} = 4 * R * (T_{\text{кр}} - T) / (g * M) \quad (11)$$

То есть, получена новая формула для определения максимальной высоты поднятия жидкости в капиллярах, в зависимости от критической температуры жидкости и молекулярной массы жидкости.

Выводы

1. Предложено физическое объяснение капиллярных явлений с точки зрения изменения внутренней энергии жидкости в капиллярах на основании концепции и геометрической модели «распаковки» вещества.

2. Для подтверждения применимости концепции «распаковки» для капиллярных явлений теоретически выведена эмпирическая формула Борелли-Жюрена для определения поднятия жидкости в капиллярах. В формуле теоретически объяснен физический смысл минимального радиуса кривизны капилляра, влияющего на подъем жидкости. Теоретически получена формула для определения максимальной высоты подъема жидкости в мелких капиллярах.

3. Выведена новая формула для определения высоты подъема жидкости в капиллярах, в зависимости от критической температуры жидкости, температуры жидкости и молекулярной массы жидкости.

Список литературы

1. Хайдаров Г.Г. О связи поверхностного натяжения жидкости с теплотой парообразования // Журн. физ. химии. – 1983. – Т. 57. – №10. – С. 2528–2530.

2. Хайдаров Г. Г. Физическая природа поверхностного натяжения жидкости // Диалоги о науке. – 2010. – №1. – С. 111–113.

3. Хайдаров Г.Г. Физическая природа поверхностного натяжения жидкости / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров, А.Ч. Машек // Вестн. С.-Петербур. унта. – 2011. – Вып. 1. – С. 3–8.

4. Khaidarov G.G. The physical nature of liquid surface tension / G.G. Khaidarov, A.G. Khaidarov // Intellectual Archive. – 2014. – Vol. 3. – №1. – P. 26–29.

5. Weisskopf V. F. Search for Simplicity // American J. of Physics. – 1985. – Vol. 53. – №1. – P. 19–20.

6. Weisskopf V.F. Search for Simplicity: The size of molecules revisited // American J. of Physics. – 1985. – Vol. 53. – №7. – P. 618–619.

7. Хайдаров Г.Г. Вывод теоретической зависимости поверхностного натяжения от температуры из теории «распаковки молекул» // Диалоги о науке. – 2011. – №2. – С. 33–38.

8. Хайдаров Г.Г. Влияние температуры на поверхностное натяжения / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров, А.Ч. Машек, Е.Е. Майоров // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2012. – Вып. 1. – С. 24–28.

9. Eötvös rule [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Eötvös_rule (дата обращения: 01.07.2018).

10. Хайдаров Г.Г. Взаимосвязь температур плавления, кипения и критической температуры / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров // Интерактивная наука. – 2016. – №3. – С. 113–116.

11. Khaidarov G.G. The Relationship Between Melting Point, Boiling Point and Critical Point / G.G. Khaidarov, A.G. Khaidarov // Intellectual Archive. – 2016. – Vol. 5. – №2. – P. 15–19.

12. Хайдаров Г.Г. Физическая модель взаимосвязи температур плавления, кипения и критической температуры // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2016. – №35 (61). – С. 10–13.

13. Хайдаров Г.Г. Взаимосвязь температур плавления и кипения веществ из гипотезы распаковки вещества / Г.Г. Хайдаров, А.Г. Хайдаров // Интерактивная наука. – 2018. – №8 (30). – С. 27–31.

References

1. Khaidarov, G.G. (1983). O sviazi poverkhnostnogo natiazheniia zhidkosti s teplotoi paroobrazovaniia. Zhurn. fiz. khimii, 10, 2528–2530.

2. Khaidarov, G.G. (2010). Fizicheskaia priroda poverkhnostnogo natiazheniia zhidkosti. Dialogi o nauke, 1, 111–113.

3. Khaidarov, G.G., Khaidarov, A.G., & Mashek, A.Ch. (2011). Fizicheskaia priroda poverkhnostnogo natiazheniia zhidkosti. Vestn. S.-Peterb. un-ta, 3–8.

4. Khaidarov G.G. The physical nature of liquid surface tension / G.G. Khaidarov, A.G. Khaidarov // Intellectual Archive. – 2014. – Vol. 3. – №1. – P. 26–29.

5. Weisskopf V. F. Search for Simplicity // American J. of Physics. – 1985. – Vol. 53. – №1. – P. 19–20.

6. Weisskopf V.F. Search for Simplicity: The size of molecules revisited // American J. of Physics. – 1985. – Vol. 53. – №7. – P. 618–619.

7. Khaidarov, G.G. (2011). Vyvod teoreticheskoi zavisimosti poverkhnostnogo natiazheniia ot temperatury iz teorii "raspakovki molekul". Dialogi o nauke, 2, 33–38.

8. Khaidarov, G.G., Khaidarov, A G., Mashek, A.Ch., & Maiorov, E.E. (2012). Vliianie temperatury na poverkhnostnoe natiazheniia. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta, 24–28.

9. Eotvos rule. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/Eotvos_rule

10. Khaidarov, G.G., & Khaidarov, A.G. (2016). Vzaimosviaz' temperatur plavlenniia, kipeniia i kriticheskoi temperatury. Interaktivnaia nauka, 3, 113–116.

11. Khaidarov G.G. The Relationship Between Melting Point, Boiling Point and Critical Point / G.G. Khaidarov, A.G. Khaidarov // Intellectual Archive. – 2016. – Vol. 5. – №2. – P. 15–19.

12. Khaidarov, G.G. (2016). Fizicheskaia model' vzaimosviasi temperatur plavlenniia, kipeniia i kriticheskoi temperatury. Izvestiia Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta), 35 (61), 10–13.

13. Khaidarov, G.G., & Khaidarov, A.G. (2018). Vzaimosviaz' temperatur plavlenniia i kipeniia veshchestv iz gipotezy raspakovki veshchestva. Interaktivnaia nauka, 8 (30), 27–31.

Хайдаров Геннадий Гасимович – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Россия, Санкт-Петербург.

Haydarov Gennadiy Gasimovich – candidate of engineering sciences, associate professor at the St. Petersburg State Technological Institute (technical university), Russia, St. Petersburg.

Хайдаров Андрей Геннадьевич – канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», Россия, Санкт-Петербург.

Haydarov Andrey Gennadyevich – candidate of engineering sciences, associate professor at the St. Petersburg State Technological Institute (technical university), Russia, St. Petersburg.
