

Соотношение температурных и концентрационных эффектов при конвекции паров в воздухе

Н. А. Винниченко,* Ю. Ю. Плаксина, О. С. Якимчук, А. В. Пуштаев, А. В. Уваров
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет,
 кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
 (Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Рассматривается температурно-концентрационная конвекция в воздухе при испарении вещества с молярной массой больше, чем у воздуха. Показано, что для некоторых веществ (бутиловый спирт, нафталин), в зависимости от температуры поверхности, может наблюдаться как конвективный поток, направленный вниз, так и конвективный поток, направленный вверх. Обсуждается использование аналогии тепло- и массообмена в численном моделировании и при интерпретации экспериментальных результатов, полученных теневым фоновым методом. Показано, что при выполнении условий подобия использование аналогии позволяет найти поля температуры и концентрации пара, хорошо согласующиеся с результатами моделирования. Нарушение условий подобия, в том числе наличие дополнительных граничных условий, приводит к невозможности разделения температурного и концентрационного вклада в измеренное поле показателя преломления.

PACS: 47.55.P-, 47.80.Jk

УДК: 536.253

Ключевые слова: конвекция, теневой фоновый метод, аналогия тепло- и массообмена.

Большинство исследований испарения, как теоретических, так и экспериментальных, посвящены испарению воды. Однако пары многих жидкостей, используемых в технике, в отличие от водяного пара, имеют молярную массу больше, чем у воздуха. Принято считать, что такой пар всегда будет опускаться вниз, и испарение жидкости из открытого сосуда будет происходить за счет диффузии, а не за счет конвекции. В настоящей работе показано, что это не так: знак полного числа Рэлея (с учетом и температурной, и концентрационной составляющей), а соответственно, и направление конвективного течения, определяется не только молярной массой пара, но и зависимостью давления насыщенного пара от температуры. Для веществ с молярной массой пара больше, чем у воздуха, знак полного числа Рэлея определяется взаимным положением температурной кривой насыщенного пара и прямой

$$p(T) = \frac{p_0 (T_{surf} - T_\infty) \mu_{air}}{T_\infty (\mu_{vap} - \mu_{air})}. \quad (1)$$

Здесь p_0 — атмосферное давление, T_{surf} — температура поверхности испаряющегося вещества, T_∞ — температура воздуха вдали от поверхности, μ_{air} и μ_{vap} — молярные массы воздуха и пара, предполагается, что воздух вдали не содержит паров. У некоторых веществ (бутиловый спирт, нафталин), имеющих достаточно низкое давление насыщенного пара, существует интервал температур, в котором прямая (1) лежит выше кривой насыщенного пара (рис. 1). Это означает, что горячий воздух, насыщенный парами, будет легче холодного воздуха вдали от сосуда с испаряющимся веществом, и возникнет конвективное течение вверх. На-

против, при испарении этилового спирта полное число Рэлея отрицательно при любой температуре поверхности. Важную роль может играть и объемная конденсация пара: горячий воздух вблизи поверхности испаряющегося вещества, утратив в результате конденсации излишки тяжелого пара и нагревшись, становится легче, что может привести к локальному изменению направления конвективного потока. Вопрос о знаке полного числа Рэлея и направлении конвекции важен, поскольку скорость испарения при отрицательном полном числе Рэлея сильно зависит от расстояния между поверхностью испаряющегося вещества и верхним краем боковых стенок сосуда. В этом случае зависимость концентрации пара от вертикальной координаты будет линейной на участке от поверхности вещества до верхнего края стенок, а выше будет наблюдаться перетекание воздушно-паровой смеси через край сосуда. При положительном полном числе Рэлея влияние боковых стенок на скорость испарения значительно слабее. Высокие стенки лишь несколько уменьшают приток воздуха к поверхности испаряющегося вещества.

Для измерения полей концентрации пара в воздухе, как правило, применяются оптические методы, также чувствительные к пространственным изменениям температуры: интерферометрия [1], теневой фоновый метод [2], инфракрасная спектрометрия [3]. Температурным фактором при этом пренебрегают. При измерениях полей температуры пламени, напротив, часто пренебрегают влиянием концентраций различных компонентов [4], хотя и на интерференционную картину, и на рефракционное отклонение лучей, и на поглощение инфракрасного излучения влияют как поле температуры, так и поля концентраций. В настоящей работе предлагается использовать для интерпретации результатов, полученных при съемке теневым фоновым методом воздуха у поверхности испаряющегося вещества,

*E-mail: nickvinn@yandex.ru

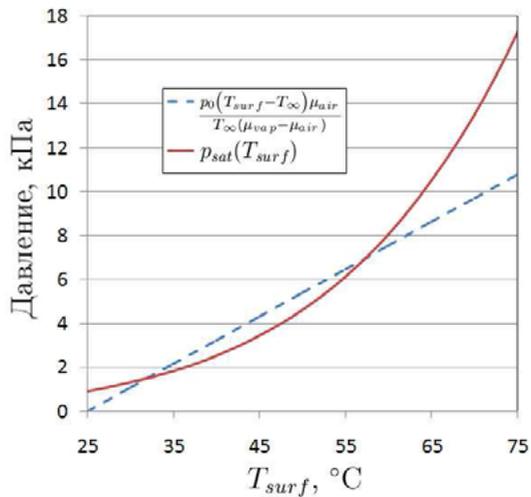


Рис. 1: Определение знака полного числа Рэлея для конвекции паров бутанола

аналогию тепло- и массообмена. Эта аналогия основана на подобии уравнений энергии и переноса примеси, которое в случае равенства коэффициентов диффузии и температуропроводности, а также при подобии граничных условий, приводит к подобию полей температуры и концентрации. В виде аналогии Чилтона–Колборна [5] она широко применяется в инженерной практике для измерения коэффициентов теплопередачи. В геофизике подобие скрытого и контактного потоков тепла при испарении с поверхности водоема было замечено Боуэном [6]. В настоящей работе предполагается, что концентрация пара c является функцией температуры, что позволяет разделить концентрационный и температурный вклад в наблюдаемую рефракцию. Точный вид психрометрической кривой может быть определен для двух предельных случаев — отсутствия объемной конденсации и мгновенной объемной конденсации. В первом случае зависимость $c(T)$ определяется из законов сохранения при смешении воздуха и пара при постоянном давлении [7]

$$\frac{c - c_\infty}{T - T_\infty} = \frac{c_{surf} - c_\infty}{T_{surf} - T_\infty} \frac{T_{surf}}{T}. \quad (2)$$

В случае мгновенной объемной конденсации состояние воздушно-паровой смеси при удалении от поверхности сначала изменяется вдоль кривой насыщенного пара, а в точке, где конденсация прекращается, переходит на аналогичную (2) кривую. Подстановка полученной зависимости $c(T)$ в формулу Лоренц–Лоренца, записанную с учетом уравнения состояния газовой смеси,

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi N_A}{3} \left(\frac{\alpha_{air}}{\mu_{air}} \left(\frac{p_0 \mu_{air}}{RT} - \frac{\mu_{air}}{\mu_{vap}} c(T) \right) + \frac{\alpha_{vap}}{\mu_{vap}} c(T) \right), \quad (3)$$

где n — показатель преломления, N_A — число Авогадро, R — газовая постоянная, α_{air} и α_{vap} — поляризуемости воздуха и пара, соответственно, позволяет найти распределения температуры и концентрации пара по полю показателя преломления.

Экспериментальные измерения полей температуры и концентрации пара при испарении бутилового спирта были проведены для вертикальной пластины, на нагреваемую часть которой (высотой 10.3 см и шириной 3.8 см) была натянута ткань, смоченная бутиловым спиртом. Такая постановка эксперимента позволяет наглядно демонстрировать изменение направления конвективного течения для различных температур пластины. Фон состоял из черных квадратных пятен, хаотично расположенных на белых листах бумаги. Расстояние от фона до фазового объекта (т.е. до нагреваемой части пластины), которое определяет чувствительность теневого фонового метода, составляло 49.5 см. Для разрешения пограничного слоя у поверхности пластины пластина размещалась посередине кадра. Для определения поля показателя преломления и последующего нахождения температуры и концентрации пара с помощью формул (3) и (2) (в отсутствие объемной конденсации) нужно знать температуру невозмущенной среды T_∞ и T_{surf} — температуру поверхности, с которой происходит испарение. T_∞ измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары, а T_{surf} — с помощью тепловизора FLIR SC7700-M (диапазон длин волн 3.7–4.8 мкм). Поле смещений определялось с помощью многопроходного кросс-корреляционного метода с целочисленным сдвигом областей опроса [8]. Поле показателя преломления было найдено с помощью численного решения уравнения Пуассона с заданием граничного условия $n = n(T_\infty)$ на границе изображения вдали от нагреваемой пластины. На рис. 2 показано сравнение среднего поля температуры, определенного экспериментально по 60 снимкам, сделанным в течение 1 минуты, с результатом двумерного численного моделирования. При температуре поверхности пластины 50°C прямая (1) лежит выше кривой насыщенного пара, полное число Рэлея, определенное по длине пластины, равно 10^6 и конвективное течение направлено вверх. Наблюдается хорошее согласие между полем температуры, полученным в численном моделировании, и результатом эксперимента, что свидетельствует о корректном разделении температурного и концентрационного вклада в регистрируемый показатель преломления. Среднее поле температуры, полученное в эксперименте с температурой поверхности пластины 85°C, показано на рис. 3. Полное число Рэлея в этом случае равно $-6 \cdot 10^6$. Видно, что конвективное течение направлено вниз, но на мгновенных распределениях температуры (не показаны) присутствуют существенные неоднородности, свидетельствующие об образовании вихрей. Предварительные результаты численного моделирования говорят о том, что существенную роль при этой температуре поверхности играет объемная конденсация бутанола: без учета объемной

конденсации в потоке, направленном вниз, лишь изредка образуются вихри Кельвина–Гельмгольца, а при использовании модели мгновенной конденсации все течение сильно неоднородно. Подробное рассмотрение этого случая является темой дальнейших исследований и выходит за рамки настоящей работы.

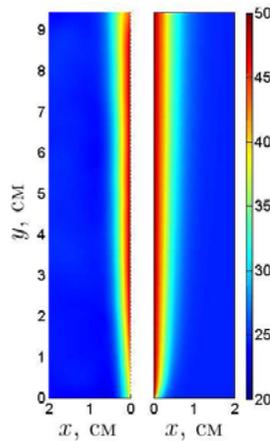


Рис. 2: Слева — поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) в воздухе при испарении бутанола с вертикальной нагретой пластины, измеренное теньвым фоновым методом, справа — поле температуры, полученное численным моделированием. Температура поверхности пластины 50°C

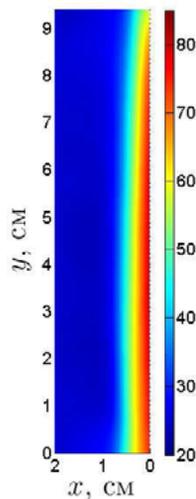


Рис. 3: Поле температуры ($^{\circ}\text{C}$) в воздухе при испарении бутанола с вертикальной нагретой пластины, измеренное теньвым фоновым методом. Температура поверхности пластины 85°C

Также были проведены эксперименты по испарению этилового спирта, как в уже рассмотренной конфигурации конвекции около вертикальной нагретой пластины, смоченной исследуемой жидкостью, так и из открытого сосуда с теплопроводящими стенками. В последнем случае подобие полей концентрации и температуры нарушается из-за наличия дополнительной границы — нагретых боковых стенок сосуда, воздух возле которых теплый, но не содержит пара спирта. Конвекция воздуха, нагревающегося от стенок сосуда, приводит к появлению дополнительного потока, увлекающего тяжелый пар этанола вверх. В этом случае предложенное разделение температурного и концентрационного вклада неприменимо, и теневой фоновый метод дает только поле показателя преломления.

Аналогия тепло- и массообмена может быть использована при описании конвекции воздушно-паровой смеси не только для интерпретации результатов эксперимента, но и в численном моделировании. Если выполнены условия подобия и отсутствует объемная конденсация, то можно не решать уравнение переноса пара, а учесть концентрационный вклад в силу Архимеда с помощью эффективного коэффициента расширения β^* в уравнении состояния

$$\rho = \rho_{\infty} (1 - \beta^* (T - T_{\infty})), \quad (4)$$

$$\beta^* = \frac{1}{T_{surf}} - \left(1 - \frac{\mu_{air}}{\mu_{vap}}\right) \frac{c_{surf} - c_{\infty}}{\rho_{\infty} (T_{surf} - T_{\infty})}. \quad (5)$$

Если требуется найти поле концентрации пара, это можно сделать после расчета, воспользовавшись формулой (2). Таким образом, при выполнении условий подобия численное моделирование может проводиться по упрощенной модели с помощью программных пакетов, не описывающих перенос пара. В случае нарушения условий подобия, в частности, появления в задаче дополнительных граничных условий, численное моделирование должно проводиться с использованием уравнения переноса пара, а сравнение с экспериментом может быть выполнено только для поля показателя преломления.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-03049). При проведении измерений было использовано оборудование, полученное по Программе развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

- [1] Dehaeck S., Rednikov A., Colinet P. Langmuir. **30**. P. 2002. (2014).
 [2] Kotchourko N., Kuznetsov M., Kotchourko A., Grune J., Lelyakin A., Jordan T. Int. J. Hydrogen Energy. **39**. P. 6201. (2014).

- [3] Kelly-Zion P.L., Pursell C.J., Hasbamrer N., Cardozo B., Gaughan K., Nickels K. Int. J. Heat Mass Transfer. **65**. P. 165. (2013).
 [4] Khramtsov P.P., Penyazkov O.G., Shatan I.N. Exp. Fluids. **56**, N 2. P. 31. (2015).

- [5] *Chilton T.H., Colburn A.P.* Industr. Engng. Chem. **26**. P. 1183. (1934). Kusadasi, Turkey. Paper 95.
- [6] *Bowen I.S.* Phys. Rev. **27**. P. 779. (1926). [8] *Scarano F., Riethmuller M.L.* Exp. Fluids. **26**, N 6. P. 513. (1999).
- [7] *Vinnichenko N., Uvarov A., Plaksina Yu., Yakimchuk O.* Proc. Int. Symp. Conv. Heat Mass Transfer. 2014.

Relative contribution of temperature and concentration effects for vapor convection in air

N. A. Vinnichenko^a, Yu. Yu. Plaksina, O. S. Yakimchuk, A. V. Pushtaev, A. V. Uvarov

Chair of Molecular Processes and Extreme Matter States, Faculty of Physics, M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^anickvinn@yandex.ru

We consider combined temperature- and concentration-driven convection in air during evaporation of a substance with molar mass exceeding molar mass of air. It is shown that some substances (butanol, naphthalene) can exhibit both downward and upward convective flow, depending on the surface temperature. Using heat and mass transfer analogy in numerical modeling and for interpretation of experimental results, obtained with background oriented schlieren technique, is discussed. We show that if the analogy conditions are satisfied, it is possible to obtain temperature and vapor concentration fields in good agreement with simulation results. If analogy conditions are violated, e.g. if additional boundary conditions are present, temperature and concentration contributions to measured refractive index field can not be separated.

PACS: 47.55.P-, 47.80.Jk.

Keywords: convection, background oriented schlieren, heat and mass transfer analogy.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Винниченко Николай Аркадьевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (495) 939-26-94, e-mail: nickvinn@yandex.ru.
2. Плаксина Юлия Юрьевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; тел.: (495) 939-26-94, e-mail: yu-plaksina@mail.ru.
3. Якимчук Ольга Сергеевна — e-mail: voronovaos@yandex.ru.
4. Пуштаев Алексей Владимирович — аспирант; e-mail: pushtaev@yandex.ru.
5. Уваров Александр Викторович — докт. физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-26-94, e-mail: uvarov@phys.msu.ru.