

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ. СТАРАЯ ЗАДАЧА, НОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В.И. Терехов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Детальное исследование закономерностей тепло и – массопереноса при испарении капель жидкости проводится практически полтора столетия. У истоков этой науки стояли Срезневский [1], Максвелл [2], а затем исследования были продолжены и развиты Фуком [3], Сполдингом [4] и многими учеными. К настоящему времени накоплен огромный объем экспериментального и теоретического материала, созданы многочисленные методы расчетов сопряженного тепломассопереноса и зависимости скорости испарения от влияния большого числа факторов. С работами в этой области можно ознакомиться в серии российских и зарубежных обзоров и монографий [5-8].

Большой интерес к этой проблеме обусловлен прежде всего широкими практическими приложениями, где процессы испарения и горения капель жидкости являются определяющими. К таковым можно отнести охлаждение жидкой фазы в градирнях и сильно нагретых поверхностей энергетических установок, рабочие процессы в камерах сгорания ЖРД и ДВС, в химических технологиях, при нанесении красок и покрытий, а также во многих других областях новой техники. В последние годы наблюдается значительный рост интереса к этой теме в аграрной промышленности, в борьбе с пожарами, медицине, биологии.

Несмотря на значительный прогресс и огромное количество экспериментальных и теоретических работ интерес и необходимость в проведении исследований гидродинамических и тепловых аспектов при движении капель жидкости с фазовыми и химическими превращениями не снижается. Это объясняется сложностью протекающих процессов и их зависимостью от большого числа факторов. Попытка проведения детального анализа имеющихся данных и прогноз развития исследований в перспективе является главной целью настоящей работы.

Оговоримся сразу, что речь в докладе пойдет о движущихся в газовой среде каплях, либо подвешенных на тонких нитях. Капли лежащие на поверхности имеют принципиальное отличие за счет их взаимодействия с поверхностью и они требуют отдельного рассмотрения. Основное внимание уделяется физике испарения капель многокомпонентного и в частности бинарного состава, а также рои наличия внутри капель различных включений – твердых нано - частиц, поверхностно-активных веществ, растворенной соли и других веществ. При этом преимущественно будут рассматриваться одиночные капли; вопрос об их взаимодействии также требует специального анализа. Отметим, что даже и при таком ограничении рассмотреть все особенности процесса испарения представляет серьезную проблему. Основное внимание в работе будет уделено анализу экспериментальных результатов.

В настоящее время имеется значительное число корреляционных соотношений для коэффициентов тепло и - массоотдачи. В большинстве это эмпирические соотношения. Наиболее достоверными и широко используемыми являются данные Ренца-Маршалла [9], которые на протяжении длительного времени уточняются применительно к различным условиям, таким как высокие температуры, градиент скорости, радиационный теплотенос и другие факторы. Достаточно серьезно и детально изучался вопрос о влиянии

внутренней циркуляции жидкости в капле на скорость испарения [10], дополнительного теплопритока через поддерживающую нить [3,11] и других факторов, оказывающих значительное воздействие на процесс испарения.

Одним из интересных явлений, обнаруженных в последние годы в работе [12] при термографическом сканировании испаряющихся капель чистой жидкости и бинарных смесей, является установление сильных неоднородностей по температуре на испаряющейся поверхности. Этот эффект авторы связывают со спонтанной генерацией паровых зародышей [13], однако до конца этот интересный эффект еще не изучен, как в экспериментальном, так и теоретическом плане.

Работы по испарению многокомпонентных или, как предельный случай, капель бинарных жидкостей вызывают постоянный интерес, поэтому интенсивно проводятся во многих лабораториях мира. В этой задаче есть несколько ключевых проблем. Во-первых, это адекватное описание условий равновесия на межфазной границе и, во-вторых, расчет многокомпонентной диффузии внутри капли. Последнее является одной из принципиальных задач при экспериментальном исследовании. Имеющиеся методы измерения состава испаряющихся капель по времени являются весьма сложными и не точными, что требуют дальнейшего совершенствования [14]. Что касается непосредственно состояния экспериментальных данных по скорости испарения капель бинарных жидкостей, то его можно охарактеризовать как этап накопления информации [15]. Большой спектр интересующих с точки зрения физики и технических приложений растворов органических и неорганических жидкостей и ограниченность информации по ним затрудняют в настоящее время сделать это.

Большой интерес вызывают исследования капель жидкостей, содержащих включения наночастиц различных материалов. Он был обусловлен обнаруженным в работе [16] сильным увеличением скорости испарения при добавлении наночастиц. В тоже время рядом исследователей этот эффект не подтвердился [17], а некоторых исследованиях показано снижение интенсивности массопереноса при добавлении частиц малого размера [18]. Все отмеченное говорит в пользу детального изучения процесса испарения капель жидкостей коллоидного состава.

В докладе рассмотрен широкий круг проблем тепломассопереноса в каплях жидкости при наличии фазовых переходов на их поверхности.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программой ОЭММиПУ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Срезневский Б. // Журнал Русского физико-химического общества. 1882. № 14. С. 420.
2. Maxwell J.C. // Collected scientific papers. 1890. V. 2. P. 625.
3. Fuchs N.A. Evaporation and droplet growth in gaseous media, London, Pergamon Press. 1959.
4. Spalding D.B. Some fundamentals of combustion, London, Butterworth's. 1955.
5. Варшавский Г.А. Горение капли жидкого топлива. Диффузионная теория//Теория горения порохов и взрывчатых веществ. М.: Наука, 1982.
6. Sirignano W. A. Fuel droplet vaporization and spray combustion theory // Prog. Energy Combust. Sci. 1983. Vol. 9. P. 291 - 322.
7. Sazhin S. S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation // Prog. Energy Combust. Sci. 2006. Vol. 32. P. 162 - 214.
8. Law C.K. Recent advances in droplet vaporization and combustion // Prog. Energy Combustion Sci. 1982. Vol. 8. P. 169 - 199.
9. Ranz W. E., Marshall W. R. // Chem. Eng. Prog. 1952. Vol. 48. P. 141 - 146 and 173 - 180.
10. Prakash S. and Sirignano W. A. Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulating liquid phase // Int. J. Heat. Mass. Transfer. 1980. Vol. 23. P. 253 - 268.

11. **Han K., Song G., Ma X., Yang B.** An experimental and theoretical study of the effect of suspended thermocouple on the single droplet evaporation // *Appl. Thermal Eng.* 2016. Vol. 101. P. 568–575.
12. **Анисимов М.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** О неравномерности температуры на поверхности испаряющихся жидких капель Труды XV Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, 23-26 мая 2016 г., Минск, Беларусь, – 2016,– № 2-01, – 6 с.
13. **Анисимов М.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Генерация паровых зародышей на поверхности испаряющихся капель наножидкости// Материалы IV Международной научно-технической конференции «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ», 17-18 мая 2017 г., Ст- Петербург, с. 55-56.
14. **Назаров А.Д., Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Емкостной метод измерения концентрации компонентов в каплях бинарных растворов// *Журнал технической физики*, 2011, том 81, вып. 4. С. 45-49.
15. **Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч.** Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости// *ИФЖ*, 2010. Т. 83, № 3, С.
16. **Zhang W., Shen R., Lu K., Ji A., and Cao Z.** Nanoparticle enhanced evaporation of liquids: A case study of silicone oil and water// *AIP Advances*. 2012, Vol. 2, 042119.
17. **Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Испарение капель воды с углеродными нанотрубками // *Письма в ЖТФ*, 2012, том 38, вып. 1. С. 51-57.
18. **Yan Wei Y., Weiwei Deng W., Ruy-Hung Chen R-H.** Effects of insoluble nano-particles on nanofluid droplet evaporation// *Int. J. Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 97, P. 725–734.