

Южно-Уральский государственный университет

Кафедра оптоинформатики

Деревянных Михаил Игоревич

**ВЛИЯНИЕ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ НА
СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТИ С ПОВЕРХНОСТИ КАПЛИ**

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Научный руководитель:

проф. А.Е. Коренченко

Челябинск 2018

Оглавление

Введение	3
Глава 1 Исследование системы капля – окружающая среда. Обзор литературы	5
Глава 2 Пакет DROPLET. Решение тестовой задачи о колебаниях свободной сферической капли	12
2.1 Пакет DROPLET	12
2.2 Решение задачи Рэлея для колебаний сферической капли идеальной жидкости	13
2.3 Решение Чандрасекара для вязкой жидкости	15
2.4 Математическая модель для описания колебаний свободной сферической капли	17
Глава 3 Математическая модель задачи об испарении капли в воздушную среду.	24
3.1. Поведение межфазной границы	24
3.2 Колебания капли при условии вынужденной конвенции	24
3.3 Испарение жидкости при условии вынужденной конвенции	27
Выводы	29
Список литературы	30

Введение

Испарение — это процесс фазового перехода вещества из жидкого состояния в парообразное, который происходит на поверхности вещества. Процесс испарения является обратным процессу конденсации. При испарении с поверхности жидкости или твёрдого тела вылетают частицы, при этом их кинетическая энергия должна быть достаточна для совершения работы, необходимой для преодоления сил притяжения со стороны других молекул жидкости.

Испарение — это процесс, с которым человек сталкивался постоянно и научился использовать это явление в своих нуждах. На протяжении нескольких десятков лет процессы испарения активно изучаются в научных лабораториях по всему миру.

Испарение веществ находят широкое применение в технике. Процесс испарения лежит в основе работы двигателей внутреннего сгорания; применяется в устройствах тепловой энергетики и устройствах атомной промышленности; холодильных и криогенных установках; процессах дистилляции, выпарки, которые активно используются в химической технологии; в пищевом производстве; а также в основе всех процессов сушки материалов.

В космической технике быстроиспаряющимися веществами часто покрывают спускаемые аппараты. Когда аппарат проходит через атмосферу планеты, его корпус нагревается в результате трения, а покрывающее его вещество начинает быстро испаряться. Когда оно испаряется, то охлаждает космический аппарат, что спасает его от перегрева. Процесс охлаждения воды при ее испарении используется в различных приборах, например, в психометрах — приборах, которые служат для измерения влажности воздуха. Важным фактором скорости испарения является также площадь поверхности жидкости, с которой происходит испарение: из узкого стакана оно будет происходить медленнее, чем из широкой тарелки. Кроме того, на испарение

влияет скорость внешней (по отношению к веществу) диффузии и внешние течения газа – вынужденная конвекция.

Целью настоящей выпускной квалификационной работы является численное исследование системы лежащая «капля-воздушная среда» для выявления зависимости скорости испарения жидкости с поверхности капли от течений в газовой среде, обусловленных внешними силами.

Для решения поставленной цели были выдвинуты следующие задачи:

- 1) освоение программного пакета DROPLET и его тестирование на задаче Рэлея –Чандрасекара о колебаниях свободной сферической капли
- 2) введение в пакет вынужденной конвекции в газовой фазе. Проверка написанного пакета в условиях совместимости с цилиндрической симметрией капли
- 3) расчет зависимости скорости испарения жидкости с поверхности капли в условиях вынужденной конвекции в газовой фазе.

Выводы

В работе проведено исследование влияния вынужденной конвенции в газовой среде на поведение капли, лежащей на горизонтальной подложке.

Получены следующие результаты:

- 1) проведено тестирование программы сравнением численно полученных частоты и коэффициента затухания основной моды свободной сферической капли с результатами решений Рэля и Чандрасекара. Показано, что ошибка определения частоты не превышает 3%, тогда как погрешность определения коэффициента затухания может составлять до 20%;
- 2) обнаружено, что реакция лежащей капли на пульсирующий поток воздуха состоит в возникновении колебаний на частоте основной моды, причем колебания возникают как в случае «включения» конвективного течения, так и в случае его «выключения»;
- 3) выявлено, что скорость испарения жидкости с поверхности капли возрастает в $\sim 1,5$ раза в присутствии конвективного течения в сравнении со случаем неподвижной газовой среды.

Список литературы

1. Tarasevich Yu.Yu. Mechanisms and models of the dehydration self-organization in biological fluids. *Physics-Uspexhi*. 2004. Vol. 47, no. 7. pp. 717–728. DOI: 10.1070/PU2004v047n07ABEN001758
2. М.В. Барташевич, И.В. Марчук, О.А. Кабов. Численное моделирование естественной конвекции в лежащей капле жидкости. *Теплофизика и аэромеханика*, 2012, том 19, № 2. УДК 536.25, 532.68
3. А.Г. Муравьев. Математическая модель охлаждения капли однокомпонентной жидкости потоком газа. 1999 Вестник Новгородского Государственного Университета №13. УДК 536.248.2
4. Л.Ю. Бараш. Испарение и динамика лежащей на подложке капли. 2009
5. В. И. Саверченко, С. П. Фисенко, Ю. А. Ходыко. Испарение бинарных пиколитровых капель на металлической подложке. УДК 536.423
6. Т.А. Яхно, В.В. Казаков, О.А. Санина, А.Г. Санин, В.Г. Яхно. Капли биологических жидкостей, высыхающие на твердой подложке: динамика морфологии, массы, температуры и механических свойств. *Журнал технической физики*, 2010
7. Виноградова О.И. Особенности гидродинамического и равновесного взаимодействия гидрофобных поверхностей. 2000, Москва
8. Батищева К.А., Исламова А.Г., Орлова Е.Г. Смачивание алюминиевого сплава АМГ-6 после обработки лазерным излучением // *Материалы докладов XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» в 3 т.; Т. 2.* – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С. 325-326.
9. Исламова А.Г., Орлова Е.Г. Испарение капель солевых растворов CaCl_2 , NaCl на алюминиевой поверхности // *Материалы докладов XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» в 3 т.; Т. 2.* – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2017. – С.335-336.
10. Lyubimov D.V. Lyubimova T.P. Shklyayev S.V. Behavior of a drop on an oscillating solid plate. *Phys. Fluids* 18, 012101 (2006); doi: 10.1063/1.2137358
11. X. Noblin, A. Buguin, F. Brochard-Wyart. Vibrated sessile drops: Transition between pinned and mobile contact line oscillations. *Eur. Phys. J. E* 14, 395–404 (2004). DOI 10.1140/epje/i2004-10021-5
12. Egry, I. Surface tension of liquid metals and alloys / I. Egry, E. Ricci, R. Novakovic, S. Ozawa // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2010. – V. 159. – P. 198–212
13. Cong Zhang, Young Du. A Novel Thermodynamic Model for Obtaining Solid–Liquid Interfacial Energies. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International* 2017. DOI: 10.1007/s11661-017-4365-6

14. Емец, Е.П. Определения вязко-упругих характеристик материалов при высоких температурах/ Е.П. Емец, Г.Ю. Коломейцев, В.В. Широков // Материалы научной сессии МИФИ. – 2006. – С. 34–35
15. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред / О.М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1984. – 519 с.
16. Moon, J.H. The lowest oscillation mode of a pendant drop / J.H. Moon, B.H. Kang // *Phys. Fluids*. – 2006. – V. 18. – P. 021702
17. A theoretical and experimental study on the oscillation of a hanging drop / T. Tsukada, M. Sato, N. Imaishi et al. // *J. Chem. Eng. Jpn.* – 1987. – V. 20. – P. 88–93
18. Egry, I The oscillating drop technique revisited / I. Egry, H. Giffard, S. Schneider // *Meas. Sci. Technol.* – 2005. – V. 16. – P. 426–431
19. Evaporation of sessile drops under combined diffusion and natural convection / Kelly-Zion P.L., Pursell C.J., Vaidya S., Batra J.// *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. -381. -p. 31-36. – 2011.
20. F. Carle, B. Sobac, and D. Brutin, “Experimental evidence of the atmospheric convective transport contribution to sessile droplet evaporation,” *Appl. Phys. Lett.* 102, 061603 (2013)
21. Qian, H., Hu, L., Liu, C., Wang, H., Gao, H., & Zhou, W. (2018). Determination of four pyrethroid insecticides in water samples through membrane emulsification-assisted liquid–liquid microextraction based on solidification of floating organic droplets. *Journal of Chromatography A*. doi.org/10.1016/j.chroma.2018.04.031
22. Dejgaard, S. Y., & Presley, J. F. (2018). New Method for Quantitation of Lipid Droplet Volume From Light Microscopic Images With an Application to Determination of PAT Protein Density on the Droplet Surface. *Journal of Histochemistry & Cytochemistry*, doi.org/10.1369/0022155417753573
23. Cao, T. D., Hussain, F., & Schrefler, B. A. (2018). Porous media fracturing dynamics: stepwise crack advancement and fluid pressure oscillations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 111, 113–133. doi.org/10.1016/j.jmps.2017.10.014
24. Wagner, B., Maier, S., Veggi, L., Pauw, J. D., & Beck, P. (2017). Analytical and numerical assessment of axial thrust balancing systems in liquid rocket engine LOx turbopumps. *EUROPEAN CONFERENCE FOR AEROSPACE SCIENCES*, 120. doi.org/10.13009/EUCASS2017-40
25. Nariai, H., & Aya, I. (1986). Fluid and pressure oscillations occurring at direct contact condensation of steam flow with cold water. *Nuclear Engineering and Design*, 95(C), 35–45. doi.org/10.1016/0029-5493(86)90034-8
26. Latka, A., Boelens, A. M. P., Nagel, S. R., & De Pablo, J. J. (2018). Drop splashing is independent of substrate wetting. *Physics of Fluids*, 30(2), 1–9. doi.org/10.1063/1.5012529
27. Hu, R.G. Larson Evaporation of a sessile droplet on a substrate J. *Phys.Chem. B* 106, 1334 (2002).

28. Nengli Zhang, David F. Chao A new laser shadowgraphy method for measurements of dynamic contact angle and simultaneous flow visualization in a sessile drop *Optics & Laser Technology* 34, 243- 248 (2002)
29. K. Sefiane, A. Steinchen, R. Moffat On hydrothermal waves observed during evaporation of sessile droplets *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 365, 95 (2010)
30. H.Y. Erbil, G. McHale, S.M. Rowan, V.I. Newton Analysis of evaporating droplets using ellipsoidal cap geometry *J. Adhes. Sci. Technol.* 13, 1375 (1999)
31. R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, T. A. Witten Contact line deposits in an evaporating drop *Phys. Rev. E* 62, 756 (2000)
32. G.J. Dunn, S.K. Wilson, B.R. Duffy, S. David, K. Sefiane A mathematical model for the evaporation of a thin sessile liquid droplet: Comparison between experiment and theory *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 323 (1-3), 50 (2008)
33. R. Mollaret, K. Sefiane, J.R.E. Christy, D. Veyret Experimental and numerical investigation of the evaporation into air of a drop on a heated surface *Chem. Eng. Res. Des.* 82 (A4), 471 (2004)
34. Yu. Barash, T.P. Bigioni, V.M. Vinokur, L.N. Shchur Evaporation and fluid dynamics of a sessile drop of capillary size *Phys. Rev. E* 79, 046301 (2009)
35. Rayleigh, Lord. Capillary phenomena of jets / Lord Rayleigh // *Proc. Roy. Soc. London A.* – 1879. – V. 29. – P. 71–79
36. Chandrasekhar, S. The oscillations of viscous liquid globe / S. Chandrasekhar // *Proc. Lond. Math. Soc.* – 1959. – V. 9. – P. 141–149
37. Smolentsev, N., Smit, W. J., Bakker, H. J., & Roke, S. (2017). The interfacial structure of water droplets in a hydrophobic liquid. *Nature Communications*, 8(May), 1–6. doi.org/10.1038/ncomms15548