

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В КАПЛЕ ЖИДКОСТИ НА ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА

Куперштох А.Л., Медведев Д.А.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,
пр. Лаврентьева 15, Новосибирск, 630090, Россия

Испарение капли, лежащей на твердой поверхности, вызывает течения жидкости внутри нее. Эти течения возникают из-за нескольких явлений: действия гравитационного поля, неоднородного испарения поверхности и эффекта Марангони [1-4]. При наличии тепловых потоков от подложки вклад эффекта Марангони становится определяющим для капель малого размера.

Описание процессов теплообмена на границе контактной линии трех фаз является сложной задачей, требующей привлечения новых вычислительных методов. В последнее время для компьютерного моделирования течений вязкой жидкости с фазовыми переходами все более широко используется метод решеточных уравнений Больцмана (Lattice Boltzmann equation method, LBM), который является сравнительно новым мезоскопическим подходом к описанию сложных течений вещества. Для расчета тепловых потоков использовался метод пассивного скаляра [5]. Для моделирования смачиваемости твердой поверхности в методе LBM общепринятыми являются подходы, в которых вводятся силы взаимодействия между узлом жидкости или пара, примыкающим к твердой поверхности, и ближайшими узлами твердой поверхности [6].

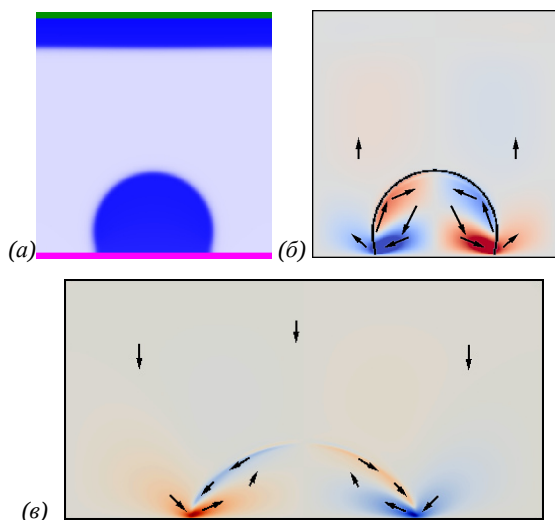


Рис. 1. Форма капли и распределения горизонтальной составляющей потока массы флюида в случае нагреваемой подложки (а,б) и охлаждаемой подложки (в). Расчетная область 200×200 (а,б), 400×200 (в). $t = 25000$ (а,б), 40000 (в).

Выполнено моделирование капли на твердой подложке в отсутствии поля тяжести. Смачивание задавалось таким, чтобы при отсутствии тепловых потоков оно было нейтральным. На рисунке показаны форма капли (рис. 1а) и распределение горизонтальной составляющей потока массы флюида (рис. 1б, красный цвет – направо, синим – налево) при 2D мо-

делировании испарения капли на нагретой горизонтальной поверхности при нейтральном смачивании. Наблюдается интенсивное испарение капли вблизи контактной линии. За счет этого контактный угол несколько увеличивается. На более холодной верхней границе капли происходит конденсация паров. Поток энергии учитывает кондуктивную составляющую за счет теплопроводности и конвективный перенос с потоком массы.

Получены картины течения жидкости внутри капли, находящейся на горячей подложке, возникающие при одновременном действии неравномерного испарения на поверхности капли и эффекта Марангони. В данном случае поверхностное натяжение изменяется вдоль поверхности капли и меньше вблизи нагретой поверхности. Поэтому в капле, лежащей на нагретой подложке, из-за поверхностных сил возникают тороидальные осесимметричные вихри, течение в которых направлено вниз около центра капли и вверх около ее поверхности.

Показано влияние формы капли, которая зависит от задаваемого угла смачивания, на возможность вихревых течений внутри нее. Для капли того же объема на смачиваемой поверхности форма капли более плоская, и вихревая структура течения внутри капли может не возникнуть.

В капле, лежащей на холодной подложке, поверхностное натяжение при приближении к холодной поверхности увеличивается. В этом случае возникают тороидальные осесимметричные вихри (рис. 1в), течение в которых направлено вверх около центра капли и вниз около ее поверхности. Вблизи контактной линии происходит конденсация жидкости. При этом контактный угол может уменьшаться (рис. 1в).

Список литературы:

1. Deegan R.D., Bakajin O., Dupont T.F., Huber G., Nagel S.R., Witten T.A. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops // *Nature*. 1997. V. 389. P. 827–829.
2. Gelderblom H., Diddens C., Marin A. Evaporation-driven liquid flow in sessile droplets // *Soft Matter*. 2022. V. 18. P. 8535–8553.
3. Chen Y., Hong F., Cheng P. Transient flow patterns in an evaporating sessile drop: A numerical study on the effect of volatility and contact angle // *Int. Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020. V. 112. P. 104493.
4. Edwards A.M.J., Atkinson P.S., Cheung C.S., Liang H., Fairhurst D.J., and Ouali F.F. Density-driven flows in evaporating binary liquid droplets // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 121, N 18. P. 184501.
5. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A., Gribanov I.I. Thermal lattice Boltzmann method for multiphase flows // *Phys. Rev. E*. 2018. V. 98, N 2. P. 023308.
6. Kupershtokh A.L., Medvedev D.A. On contact wetting angles in the lattice Boltzmann method and their measurement // *Eurasian J. of Math. and Comp. Appl.* V. 12, N 4. 2024. P. 84–91.

Работа выполнена за счет РНФ,
<https://rscf.ru/project/25-29-00310/>
(грант № 25-29-00310).