

# МЕТОД КАСАТЕЛЬНЫХ СИЛ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КОНТАКТНЫХ УГЛОВ В МЕТОДЕ РЕШЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ БОЛЬЦМАНА

А. Л. Куперштох\*, Д. А. Медведев, А. В. Альяннов

Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева

Сибирского отделения Российской академии наук

630090, Российская Федерация, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 15

\*sknew@mail.ru

Рассмотрены варианты использования метода касательных сил (TFM) для моделирования смачивания твердой поверхности в методе решеточных уравнений Больцмана (LBE). Получены картины течения жидкости внутри капли, находящейся на горячей подложке, возникающие при одновременном действии тепловой конвекции в поле тяжести и эффекта Марангони, а также из-за неравномерного испарения на поверхности капли. Показано влияние формы капли, которая зависит от угла смачивания, на возможность вихревых течений внутри нее.

Во многих задачах, рассматривающих капли или пленки на твердой поверхности, важную роль играет смачиваемость поверхностей и, соответственно, значения контактных углов. Смачиваемость зависит как от свойств жидкости, так и от свойств поверхности. Кроме того, контактные углы изменяются при влиянии на вещество электрических полей и потоков тепла за счет возникновения течений.

Для моделирования смачиваемости в методе LBE общепринятыми являются подходы, в которых вводятся силы взаимодействия между узлом жидкости или пара, примыкающим к твердой поверхности, и ближайшими узлами твердой поверхности [1]

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = B\Phi(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^k w(\mathbf{e}_j)\Phi_{\text{solid}}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_j) \cdot \mathbf{e}_j. \quad (1)$$

Здесь функция  $\Phi(\mathbf{x})$  выражается через псевдопотенциал  $U$  для флюида  $\Phi(\mathbf{x}) = \sqrt{-U}$ , то есть через уравнение состояния флюида

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sqrt{\rho\theta - P(\rho, T)}.$$

Значения  $\Phi_{\text{solid}}$  в узлах границы задается равным значениям  $\Phi(\mathbf{x})$  в ближайших жидким узлах. Параметр  $B$  (параметр адгезии) определяет смачиваемость поверхности ( $B = 1$  соответствует нейтральному смачиванию). Однако при этом оказывается, что при изменении параметра адгезии изменяется плотность жидкости в тонком слое вблизи поверхности. Это препятствует корректным расчетам тепловых потоков.

В работах [2–4] был предложен новый класс подходов, более приемлемых для реализации в методе решеточных уравнений Больцмана при наличии тепловых потоков. Идея состоит в том, что в дополнение к нейтральному смачиванию (1) при  $B = 1$  еще вводятся тангенциальные составляющие сил, действующих на вещество в узлах жидкой фазы со стороны соседних узлов на подложке (метод касательных сил, TFM). В частности, для двумерной задачи с горизонтальной поверхностью имеем

$$F_x(\mathbf{x}) = -\beta\Phi(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^2 \Phi_{\text{solid}}(\mathbf{x} + \mathbf{e}_j) \cdot e_{jx}.$$

Параметр взаимодействия  $\beta = 0$  соответствует нейтральному смачиванию,  $\beta > 0$  соответствует гидрофильным поверхностям, а  $\beta < 0$  – гидрофобным. При таком подходе плотность жидкости в слое, прилегающем к твердой поверхности, не изменяется. Исследовано влияние области действия тангенциальных сил на потоки испарения жидкости в окрестности контактной линии. В случае использования метода TFM только для узлов переходного слоя жидкость-пар (в окрестности контактной линии) эти горизонтальные силы имеют известный смысл поверхностного натяжения в вершине краевого угла смачивания в классическом законе Юнга.

На рис. 1 показаны распределения скорости флюида при 2D-моделировании испарения капли на горизонтальной поверхности в поле тяжести. Наблюдается интенсивное испарение жидкости вблизи контактной линии (рис. 1, а). На более холодной верхней границе происходит конденсация паров.

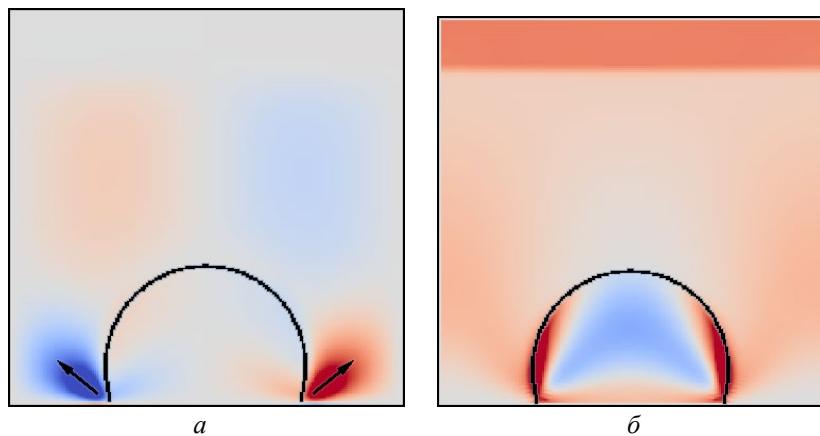


Рис. 1. Распределения горизонтальной скорости флюида (а) и вертикального потока энергии (б) для испаряющейся капли. Расчетная область  $200 \times 200$ .  $t = 25\ 000$

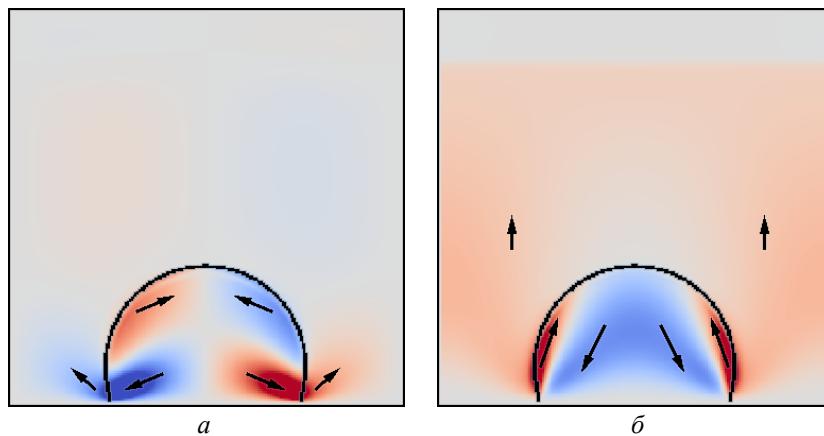


Рис. 2. Распределения горизонтального (а) и вертикального(б) потоков массы флюида. Расчетная область  $200 \times 200$ .  $t = 25000$

Получены картины течения жидкости внутри капли, находящейся на горячей подложке, возникающие при одновременном действии тепловой конвекции в поле тяжести и эффекта Марангони, а также из-за неравномерного испарения на поверхности капли. Наблюдаются вихревые течения внутри капли (рис. 2). Показано влияние формы капли, которая зависит от угла смачивания, на возможность вихревых течений внутри нее.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00310 (<https://rscf.ru/project/25-29-00310>).*

#### **Список источников**

1. Benzi R., Biferale L., Sbragaglia M., Succi S., Toschi F. Mesoscopic modeling of a two-phase flow in the presence of boundaries: The contact angle // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74(1). P. 021509.
2. Kupershokh A. L., Medvedev D. A., Alyanov A. V. Simulation of substrate cooling during evaporation of pure vapor from the surface of a thin liquid film and droplets // J. Appl. Ind. Math. 2023. Vol. 17 (3). Pp. 582–591.
3. Kupershokh A. L., Medvedev D. A., Alyanov A. V. Heat flux from the surface in the process of the rupture of a thin liquid film by an electric field // Physics of Fluids. 2023. Vol. 35 (10). P. 102006.
4. Kupershokh A. L., Medvedev D. A. On contact wetting angles in the lattice Boltzmann method and their measurement // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications/ 2024. Vol. 12 (4). Pp. 84–91.