

УДК 532.54.532.62.536.24

Влияние размеров нагревателя на испарение пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в микроканале при локальном нагреве*

О.А. Кабов^{1,2}, Ю.О. Кабова¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

E-mail: kabova@itp.nsc.ru

В результате численного исследования обнаружен эффект влияния изменения продольного и поперечного размеров нагревателя при сохранении площади нагрева постоянной на интенсивность испарения, динамику и экстремальные значения толщины тонкой пленки жидкости, движущейся в микроканале под действием потока газа при локальном нагреве. Показано, что при достаточно малых нагревах испарение интенсивнее происходит у широких нагревателей, чем у узких. Для узких и длинных нагревателей процесс испарения развивается медленнее, но затем интенсифицируется за короткое время.

Ключевые слова: испарение, пленка жидкости, локальный нагрев, микроканалы, численные исследования.

Изучение динамики и испарения тонких, увлекаемых потоком газа пленок жидкости при локальном нагреве является актуальной задачей механики и теплофизики. Оно необходимо для разработки перспективных методов охлаждения нагреваемых поверхностей в мини- и микросистемах. Взаимодействие различных механизмов, оказывающих влияние на движение и испарение неизотермической пленки жидкости, изучается экспериментально и численно [1, 2]. Исследования показывают, что динамика таких пленок весьма сложна и характеризуется такими явлениями, как развитие нелинейных волн, формирование сухих пятен и регулярных трехмерных структур [3]. Целью настоящей работы является определение особенности динамики и испарения тонкой локально нагреваемой пленки жидкости, увлекаемой потоком газа в микроканале, при сохранении площади нагрева постоянной, но при изменении продольного и поперечного размеров нагревателя.

Рассматривается совместное движение потока газа и неизотермической пленки вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном микроканале. Канал считается неограниченным в направлении движения пленки (x), а также в направлении поперек потока жидкости (y). На нижней стенке канала находится нагреватель с передней кромкой, расположенной вдоль оси y . Граница раздела газ-жидкость является деформируемой, а испарившееся вещество считается примесью в газовой фазе, не оказывающей существенного влияния на термодинамические свойства газа. Газ считается не растворимым

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (индикатор проекта RFMEFI60414X0053).

в жидкости. Движение жидкости и газа описываются уравнениями Навье–Стокса, неразрывности, энергии и диффузии. Толщина пленки и поля скорости в жидкости и в газе находятся из точного решения задачи изотермического совместного течения в канале с прямолинейными линиями тока при отсутствии возмущений, исходя из этого, начальные данные задачи имеют вид:

$$H = H_0, T = T_g = T_0, C = C_0, u = u_0(z), u_g = u_{g0}(z), v = v_g = w = w_g \equiv 0, \quad (1)$$

здесь H — локальная толщина пленки, C — массовая доля испарившегося вещества в газовой фазе, T — температура в жидкости, T_g — температура в газе, u, v, w — компоненты вектора скорости в жидкости, u_g, v_g, w_g — компоненты векторов скорости в газе, z — координата, перпендикулярная плоскости (x, y) , T_0, C_0 — заданные постоянные. Верхняя стенка канала считается адиабатической и непроницаемой. На нижней стенке микроканала поставлено тепловое условие, учитывающее возможность задания температуры подложки, зависящей от пространственных переменных $T = T_1(t, x, y)$, а также условие прилипания. На границе раздела газ–жидкость задаются: непрерывность температуры, а также касательных компонент векторов скоростей жидкости и газа, соотношения, вытекающие из законов сохранения масс и энергии, динамическое условие, включающее силовое воздействие испаряющегося вещества на жидкость, а также условие локального термодинамического равновесия. Температурные зависимости концентрации, поверхностного натяжения и динамического коэффициента вязкости жидкости имеют вид:

$$\begin{aligned} C_* &= C_0 + C_T(T - T_0) + C_{TT}(T - T_0)^2/2, \\ \mu &= 1/\mu_0 + \mu_T(T - T_0) + \mu_{TT}(T - T_0)^2/2)^{-1}, \\ \sigma &= \sigma_0 - \sigma_T(T - T_0) + \sigma_{TT}(T - T_0)^2/2, \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $C_*(T)$ — концентрация пара, соответствующая давлению насыщенного пара при температуре T ; $C_0, C_T, C_{TT}, \mu_0, \mu_T, \mu_{TT}, \sigma_0, \sigma_T, \sigma_{TT}$ — постоянные величины. При построении модели использовалось приближение тонкого слоя, при котором отношение масштабов длин мало: $\varepsilon = H_0/l \ll 1$, здесь $l = (\sigma_0 H_0^2 / \rho U^2)^{1/3}$ — масштаб продольной длины, $U = \mu_0 / \rho H_0$ — масштаб скорости, ρ — плотность жидкости. Масштаб температуры определялся следующим образом: $[T] = \max_{t,x,y} (T_1(t, x, y) - T_0)$. Задача сводится к решению

пяти дифференциальных уравнений четвертого порядка: для локальной толщины пленки, давления в газе, распределения температур в жидкости и газе и концентрации пара в газе. Используемая здесь математическая модель подробно изложена в работе [4].

Численное решение поставленной задачи проводится методом конечных разностей, с использованием метода переменных направлений, путем введения дробных шагов. Компоненты вектора скорости в жидкости и в газе, а также давление в жидкости вычисляются по явным формулам. Расчеты выполнены для воды и азота, высота канала $H_C = 250$ мкм, начальная температура $T_0 = 20$ °С. При расчетах площадь нагревателя полагалась неизменной и равной 1 см^2 , температура рабочей поверхности нагревателя задавалась равной 21 °С. Числа Рейнольдса жидкости и газа равны соответственно: $Re = 5$ и $Re_g = 15$ (при этом начальная толщина пленки $H_0 = 86,3$ мкм). Числа Рейнольдса определяются как $Re = Q\rho/\mu_0$, $Re_g = Q_g\rho_g/\mu_{g0}$, где Q, Q_g — расходы жидкого и газового потоков на единицу ширины. На графиках все величины представлены в безразмерном виде, при этом безразмерное время задается следующим образом: $t = \bar{l}\bar{U}$. Начальная массовая концентрация пара в газе $C_0\rho_g = 0,016931 \text{ кг/м}^3$ соответствует парциальному давлению при температуре насыщения 20 °С. Расчет безразмерной

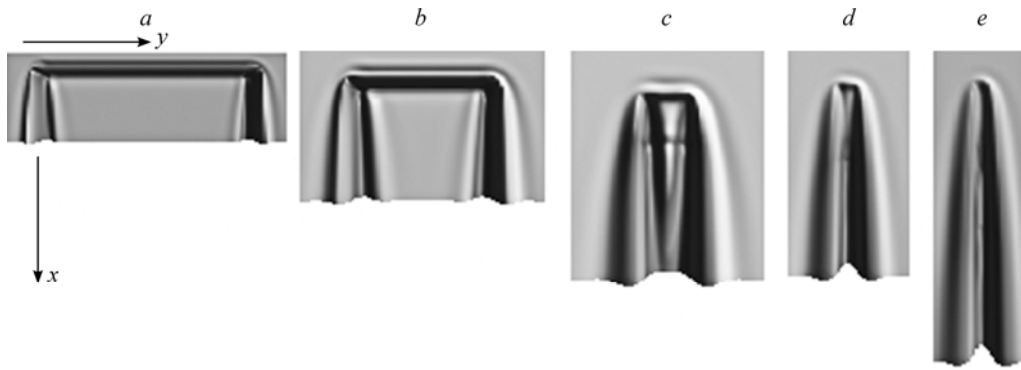


Рис. 1. Термокапиллярные деформации границы раздела газ-жидкость (вид сверху).

Размеры нагревателей (x, y) равны: $0,1 \times 10$ (a), $0,25 \times 4$ (b), 1×1 (c), $2 \times 0,5$ (d), $4 \times 0,25$ (e) см^2 .

скорости испарения жидкости во всей расчетной области проводился по формуле:

$$J_{\text{total}} = \int_{\Lambda} \frac{1}{h(x, y)} \left. \frac{\partial C}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} dx dy, \text{ где } h(t, x, y) \text{ — безразмерная локальная толщина пленки,}$$

Λ — расчетная область. Физическая размерная скорость испарения равна величине J_{total} , умноженной на постоянную $C_0 D \rho_g l^2 / H_0$ [кг/с], здесь D — коэффициент диффузии.

Обнаружено, что изменение линейных размеров нагревателя оказывает существенное влияние на характер течения пленки и деформации границы раздела газ-жидкость, а также на испарение. На рис. 1 показано положение свободной границы пленки для нагревателей одинаковой площади, но при разном соотношении размеров в направлении по потоку жидкости и поперек потока. Видно, что для нагревателей, протяженных в направлении поперек потока пленки (например, нагреватель с размерами $0,1 \times 10 \text{ см}^2$ на рис. 1a), между двумя основными боковыми волнами образуется срединная струя. По мере того, как нагреватель сужается в направлении (y) , срединная струя исчезает. Кроме того, положение областей за нагревателем, где значение толщины пленки достигает своего минимума, смещается от краев нагревателя к одной области, лежащей на оси, проходящей через центр нагревателя (см. рис. 1d, 1e, 2a).

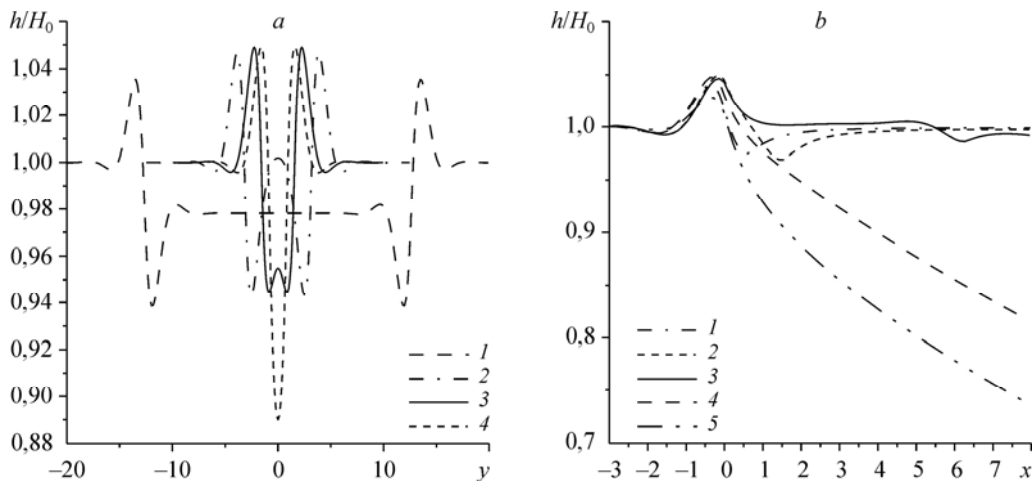


Рис. 2. Положение свободной границы пленки при различном положении относительно потока.

a — в направлении поперек потока жидкости при $x = 0,3 \text{ см}$: $0,1 \times 10$ (1), 1×1 (2), $2 \times 0,5$ (3), $4 \times 0,25$ (4) см^2 ;
b — в направлении вдоль потока жидкости при $y = 0$: $0,1 \times 10$ (1), $0,25 \times 4$ (2), 1×1 (3), $2 \times 0,5$ (4), $4 \times 0,25$ (5) см^2 .

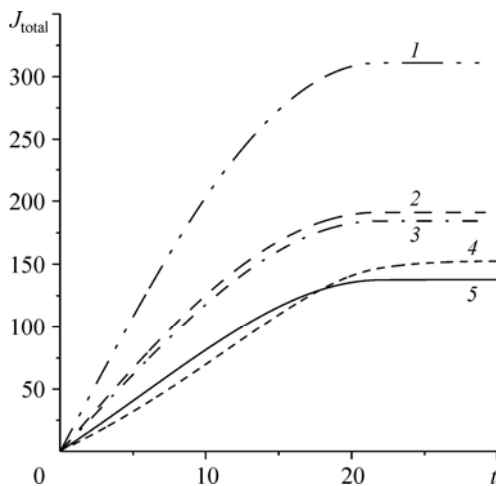


Рис. 3. Безразмерная скорость испарения жидкости от времени.

Размеры нагревателей: $0,1 \times 10$ (1), $0,25 \times 4$ (2), 1×1 (3), $2 \times 0,5$ (4), $4 \times 0,25$ (5) см^2 .

Положение вала жидкости, образующегося на передней кромке нагревателя, остается примерно постоянным независимо от ширины и длины нагревателя (рис. 2b). Значение максимальной толщины пленки мало зависит от соотношения линейных размеров нагревателя, в то время как значение минимальной толщины пленки значительно уменьшается с ростом длины нагревателя в направлении (x). Эта зависимость имеет нелинейный характер.

Объяснением служит значительный рост температуры на границе раздела газ–жидкость в нижней по потоку жидкости части длинных и узких нагревателей.

Соотношение длины и ширины нагревателя существенно влияет на интенсивность испарения жидкости (рис. 3). При достаточно малых нагревах у широких нагревателей, как видно из рисунка, испарение более интенсивно, чем для нагревателей, протяженных в направлении потока. Для нагревателей, протяженных в направлении (x), испарение с течением времени происходит медленнее, так как ширина нагревателя очень мала, но затем оно начинает расти из-за увеличения области нагрева в направлении движения жидкости и значительной диссипации тепла в направлении (y).

В работе проведено численное исследование совместного движения тонкой пленки жидкости и спутного потока газа в горизонтальном микроканале при локальном нагреве с учетом испарения. В результате численного исследования обнаружен эффект влияния изменения продольного и поперечного размеров нагревателя при сохранении площади нагрева на интенсивность испарения, динамику и экстремальные значения толщины пленки. Показано, что при достаточно малых нагревах испарение происходит интенсивнее у широких нагревателей, чем у узких. Для узких и длинных нагревателей процесс испарения развивается медленнее по сравнению с более широкими нагревателями, но затем интенсифицируется за короткое время (см. линии 4 и 5 на рис. 3). Приведены профили свободной границы пленки, расчеты трехмерных деформаций поверхности, а также безразмерной скорости испарения жидкости. Выполненные исследования качественно хорошо согласуются с результатами экспериментов в работе [5].

Список литературы

1. Кабов О.А., Кузнецов В.В., Марчук И.В., Пухначев В.В., Чиннов Е.А. Регулярные структуры при термокапиллярной конвекции в движущемся тонком слое жидкости // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2001. № 9. С. 84–90.
2. Craster R.V., Matar O.K. Dynamics and stability of thin liquid films // Reviews of Modern Physics. 2009. Vol. 81, No. 3. P. 1131–1198.
3. Гаганова Е.Я., Кабов О.А., Марчук И.В. Термокапиллярная деформация локально нагреваемой пленки жидкости, движущейся под действием газового потока // Письма в ЖТФ. Т. 30, вып. 10. 2004. С. 46–52.
4. Kabova Yu., Kuznetsov V.V., Kabov O. Gravity effect on evaporation and interfacial deformations in nonisothermal liquid film moved by a gas flow in a microgap // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2014. Vol. 2, No. 1. P. 85–102.
5. Kabov O.A. Heat Transfer from a small heater to a falling liquid film // Heat Transfer Res. 27. 1996. Vol. 1. P. 221–226.

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2014 г.,
после переработки — 10 ноября 2014 г.