

ДЕФОРМАЦИЯ МЕНИСКА ПРИ ИСПАРИЕНИИ ЖИДКОСТИ В МЕСТЕ ЕГО КОНТАКТА СО СТЕНКОЙ

АННОТАЦИЯ

Проведено расчетное моделирование взаимосвязанных процессов теплопроводности в стенке и гидродинамики и теплообмена в мениске при теплоподводе и испарении жидкости с его поверхности. Показано, что вследствие движения жидкости может происходить существенная деформация мениска вблизи его контакта со стенкой. Такую деформацию можно трактовать как изменение угла смачивания вследствие подвода тепла. Предложена математическая модель. Показано, что учет деформации мениска приводит к уменьшению в несколько раз коэффициента теплоотдачи и уменьшению капиллярного давления до 20 %.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из параметров, существенно влияющим на процессы при испарении и конденсации на твердой поверхности, является угол смачивания. Его значение зависит от целого ряда факторов, может меняться в широких пределах и обычно определяется экспериментально. Это вносит неопределенность в расчет процессов тепломассообмена при испарении с поверхности мениска, что весьма важно для таких технических устройств, как тепловые трубы.

Принято считать, что в случае пренебрежимой роли сил тяжести мениск имеет цилиндрическую форму при контакте с плоской стенкой и сферическую при контакте с цилиндрической стенкой. Однако это справедливо только в случае неподвижной жидкости. При подводе тепла от стенки к мениску происходит испарение жидкости в наиболее тонкой части мениска, т. е. на краю мениска. При этом жидкость движется в зону испарения, вследствие чего происходят потери давления в жидкости. Изменение давления в жидкости приводит к изменению радиуса кривизны, т. е. деформации поверхности мениска. Такое явление должно быть ощутимо лишь на краях мениска, где толщина пленки жидкости мала, а значит, потери давления при движении жидкости существенны. Внешне такое явление можно трактовать как изменение угла смачивания при подводе тепла к мениску. Предварительную оценку значимости этого явления можно провести на основе расчетного анализа.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Теплоперенос в стенке к мениску производится теплопроводностью. Наиболее интенсивное испарение, а значит, и отвод тепла, происходит на границе стенки в точке с минимальной толщиной пленки

жидкости ($x = 0$). В простейшем случае будем полагать, что тепло в стенке передается одномерной радиальной теплопроводностью к точке $x = 0, y = 0$. В области $x > 0$ происходит теплоотвод от стенки теплопроводностью через пленку жидкости к поверхности мениска. Конвективным переносом в жидкости пренебрегаем. Влиянием силы тяжести на деформацию мениска пренебрегаем.

В связи с изложенным выше рассмотрим сопряженную задачу одномерной радиальной теплопроводности в стенке и одномерной теплопроводности через пленку жидкости, а также движения жидкости и испарения с поверхности мениска.

Уравнение теплопроводности в стенке

$$\frac{d^2 t_w}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dt_w}{dx} = \frac{2\lambda_l}{\lambda_w \delta_l' \pi x} (t_w - t_s). \quad (1)$$

Уравнение сохранения количества движения вдоль оси x запишем в виде

$$\frac{dp_l}{dx} = -\frac{3\mu_l \bar{u}_l}{\delta_l'^2}, \quad (2)$$

а уравнение равновесия поверхности мениска -

$$\sigma \left[1 + \left(\frac{d\delta_l}{dx} \right)^2 \right]^{-1.5} \frac{d^2 \delta_l}{dx^2} = p_s - p_l. \quad (3)$$

Комбинированное уравнение сохранения энергии и массы жидкости в пленке выглядит так

$$\rho_l r \frac{d(\bar{u}_l \delta_l')}{dx} = -\frac{\lambda_l}{\delta_l'} (t_w - t_s). \quad (4)$$

Граничные условия для уравнений (1) - (4) запишем в виде:

$$\text{при } x = 0 \quad t_w = t_s, \quad \delta = 0, \quad \frac{d\delta_l}{dx} = 0, \quad \bar{u}_l = 0;$$

$$\text{при } x = L \quad p_l = p_{x=L}, \quad t_w = t_{x=L}.$$

Толщина пленки жидкости по нормали к поверхности жидкости определялась по соотношению $\delta_l' = \sqrt{(R \sin \gamma)^2 + (R \cos \gamma + \delta_l)^2} - R$, где радиус кривизны поверхности жидкости $R = \sigma / (p_s - p_l)$,

$$\gamma = \arctg \left(\frac{d\delta}{dx} \right).$$

При проведении численного решения описанная модель сводилась к задаче Коши, для чего при $x = 0$ дополнительно задавались значения p_l и t_w , а значения $p_{x=L}$ и $t_{x=L}$ вычислялись. Можно при

$x = 0$ подобрать такие значения p_l и t_w , чтобы с заданной точностью выполнялись условия при $x = L$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунках представлены результаты расчетов для случая испарения аммиака с поверхности мениска, расположенного между двумя прямоугольными ребрами. При изменении плотности теплового потока от 0 до 50000 Вт/м^2 радиус мениска вдали от стенки меняется не более чем на 10 %. Тем не менее это приводит к существенному изменению профиля мениска, как это видно из рис. 1. Основная причина этого в том, что в непосредственной близости от места контакта мениска со стенкой происходит значительное изменение радиуса кривизны. Как видно из рис. 2, это изменение происходит на расстоянии порядка 5—7 микрон. На основании этого формально можно говорить, что увеличение плотности теплового потока приводит к увеличению угла смачивания, значение которого можно определить, продлив мениск постоянного радиуса до пересечения со стенкой. Зависимость такого угла смачивания от плотности теплового потока представлена

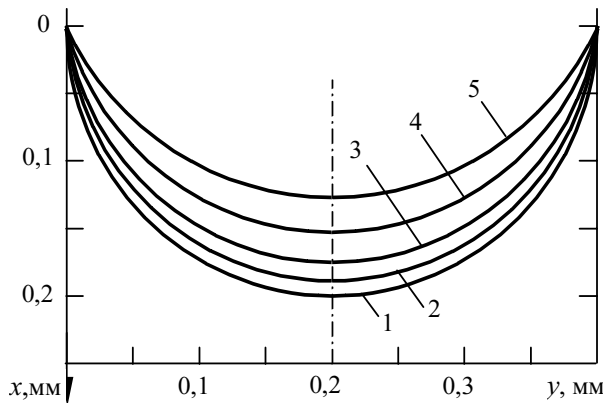


Рис. 1. Профиль мениска аммиака между двумя прямоугольными ребрами при различных значениях плотности теплового потока: 1 – $q = 0$; 2 – $q = 100 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q = 1000 \text{ Вт/м}^2$; 4 – $q = 10000 \text{ Вт/м}^2$; 5 – $q = 50000 \text{ Вт/м}^2$

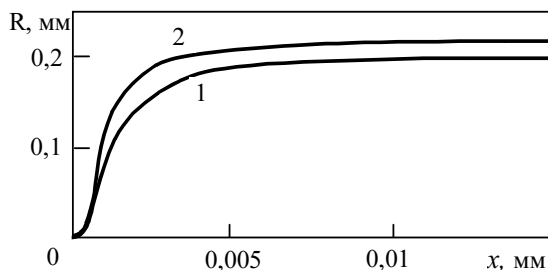


Рис. 2. Изменение радиуса мениска вдоль стенки, с которой контактирует мениск ($x = 0$ – место контакта мениска со стенкой): 1 – $q = 100 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q = 50000 \text{ Вт/м}^2$

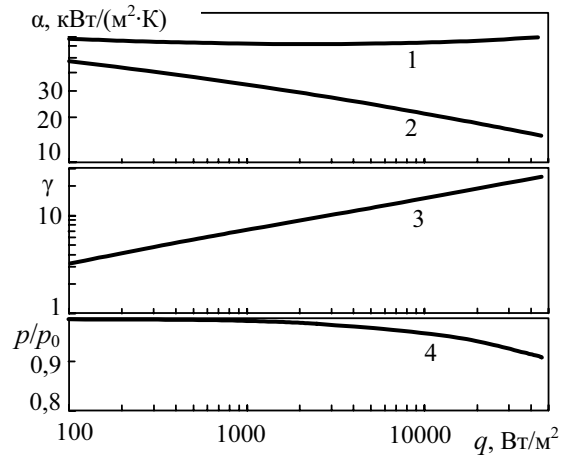


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи при недеформированном (1) и деформированном (2) мениске, угла смачивания (3) и коэффициента снижения капиллярного давления (4) от плотности теплового потока при испарении аммиака с поверхности с прямоугольными ребрами

на рис. 3 (кривая 3). Расчеты показывают, что угол смачивания возрастает до 27° при $q = 50000 \text{ Вт/м}^2$.

Деформация мениска приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи от полутора до четырех раз в рассмотренном диапазоне плотностей теплового потока (кривые 1 и 2 на рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Движение жидкости к месту испарения в зоне контакта мениска со стенкой вызывает деформацию мениска в этой области. С одной стороны, это приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи в несколько раз по сравнению с недеформируемым мениском, с другой стороны, это уменьшает капиллярное давление до 20 %. Оба эти фактора могут быть весьма важны для таких технических устройств, как тепловые трубы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- p – давление, Па;
 - R – радиус кривизны, м;
 - r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;
 - t – температура, К;
 - \bar{u} – средняя скорость, м/с;
 - x – продольная координата, м;
 - y – поперечная координата, м;
 - δ_l – толщина пленки жидкости по нормали к стенке, м;
 - λ – теплопроводность, Вт/(м·К);
 - μ – вязкость, Па·с;
 - ρ – плотность, кг/м³;
 - σ – поверхностное натяжение, Н/м;
- Индексы:
- w – стенка;
 - s – насыщение;
 - l – жидкость.