

УДК 536.25

**Исследование влияния продольных градиентов  
температуры на интенсивность испарения жидкости  
в двухслойной системе на основе точных решений**

*Е.В. Резанова*

*АлтГУ, г. Барнаул*

Исследование конвективных течений, сопровождающихся тепло- и массопереносом через границы раздела, в настоящее время является весьма актуальной задачей и осуществляется как экспериментально, так и теоретически [1–4]. В настоящей работе изучаются двухслойные течения жидкости и газопаровой смеси в горизонтальном канале с твердыми непроницаемыми стенками. На термокапиллярной границе раздела учитывается испарение, а в верхнем слое системы принимаются во внимание эффекты Соре и Дюфура [2].

Математическое моделирование исследуемых процессов проводится на основе точных решений уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека–Буссинеска вида [4]

$$u_i = \frac{y^4}{24} S_4^i + \frac{y^3}{6} S_3^i + \frac{y^2}{2} c_1^i + y c_2^i + c_3^i, \quad (1)$$

$$v_i = 0, \quad (2)$$

$$T_i = (A + a_2^i y) x + \frac{y^7}{1008} L_7^i + \frac{y^6}{720} L_6^i + \frac{y^5}{144} L_5^i + \frac{y^4}{24} L_4^i + \frac{y^3}{6} L_3^i + \frac{y^2}{2} L_2^i + y c_4^i + c_5^i, \quad (3)$$

$$C = (b_1 + b_2 y) x + \frac{y^7}{1008} N_7^i + \frac{y^6}{720} N_6^i + \frac{y^5}{144} N_5^i + \frac{y^4}{24} N_4^i + \frac{y^3}{6} N_3^i + \frac{y^2}{2} N_2^i + y c_6^i + c_7^i, \quad (4)$$

$$p_i' = \left( \frac{y^2}{2} k_2^i + y k_1^i + k_0^i \right) x + \frac{y^7}{1008} K_7^i + \frac{y^6}{720} K_6^i + \frac{y^5}{144} K_5^i + \frac{y^4}{24} K_4^i + \frac{y^3}{6} K_3^i + \frac{y^2}{2} K_2^i + y K_1^i + c_8^i, \quad (5)$$

где  $u_i$  - продольная скорость,  $T_i$  - температура,  $C$  - концентрация пара в газе в верхнем слое системы,  $p_i'$  - модифицированное давление (от-

клонение от гидростатического давления). Функции и параметры с индексом  $i = 1$  определяют течение жидкости, индекс  $i = 2$  используется для описания характеристик газопарового слоя. Коэффициенты  $S_3^i$ ,  $S_4^i$ ,  $L_j^i$ ,  $N_j^i$ ,  $K_m^i$ ,  $k_n^i$  ( $j = 2, \dots, 7$ ;  $m = 1, \dots, 7$ ;  $n = 0, \dots, 2$ ) зависят от физико-химических параметров системы «жидкость – газ»,  $c_l^i$  ( $l = 1, \dots, 8$ ) являются неизвестными константами интегрирования.

На твердых стенках канала выполняются условия прилипания для скорости, температура распределена линейно относительно продольной координаты. Концентрация пара на верхней границе системы удовлетворяет либо условию полного поглощения пара, либо условию отсутствия потока пара с учетом эффекта термодиффузии. На термокапиллярной границе раздела полагаются выполненными кинематическое и динамическое условия, условия непрерывности скорости и температуры, условие баланса масс с учетом эффекта Соре, условие переноса тепла с учетом эффекта Дюфура. Концентрация насыщенного пара может быть найдена с помощью следствия уравнений Менделеева–Клапейрона и Клапейрона–Клаузиуса, используемого здесь в линеаризованном виде [3]. Для замыкания постановки задачи необходимо задавать расход газа в верхнем слое системы. С помощью названных граничных условий задачи определяются неизвестные константы интегрирования в выражениях (1)–(5). Таким образом, определены функции продольной скорости, давления, температуры и концентрации пара, а также массы испаряющейся на границе раздела жидкости.

Дополнительный интерес представляет исследование влияния различных факторов на интенсивность испарения. Выражение, определяющее константу  $M$  (массовую скорость испаряющейся жидкости) представляет собой линейную функцию от расхода газа в верхнем слое системы  $Q$ . Зависимость  $M$  от продольного градиента температуры на границе раздела сред  $A$  и толщины жидкого слоя  $l$  имеет следующий вид:

$$M = \sum_{i,j} A^{i,j} f_j^i / \sum_k l^k f_k, \quad (6)$$

где  $i = 0, \dots, 2$ ,  $j = 0, \dots, 9$ ,  $k = 0, \dots, 3$ , а коэффициенты  $f_j^i, f_k$  зависят от физико-химических параметров исследуемых сред.

Рассмотрим полученную зависимость (6) на примере системы «жидкость – газ» типа «HFЕ-7100 – азот». Расход газа  $Q$  при этом выбран равным  $3.6 \cdot 10^{-4}$  г/(см<sup>2</sup>·с). На рисунке 1 проиллюстрировано влияние продольного градиента температуры на термокапиллярной границе и толщины жидкого слоя на массу испаряющейся с границы раздела сред жидкости (формула (6)). Зависимость функции  $M$  от продольного

градиента  $A$  носит параболический характер либо близкий к нему (см. рисунок 1а). При этом наиболее интенсивное испарение жидкости наблюдается для значения толщины нижнего слоя системы равного 0.3 см. Аналогичный результат продемонстрирован на рисунке 1б. Отметим, что данная качественная зависимость была получена в результате экспериментальных исследований [4].

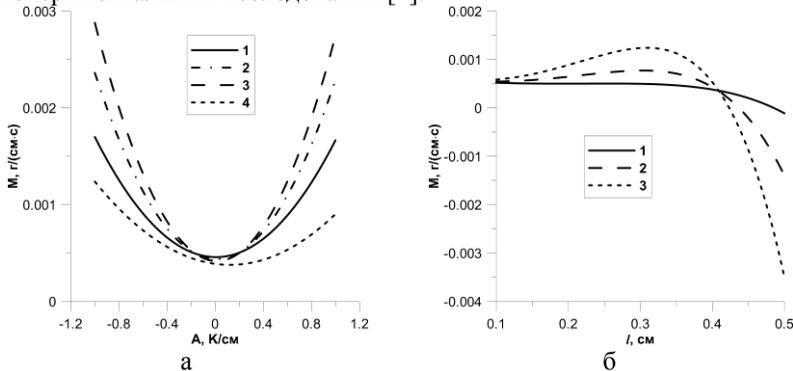


Рисунок 1 - Зависимость значения массы испаряющейся жидкости от а) продольного градиента температуры на границе раздела при различных значениях толщины жидкого слоя (1 -  $l = 0.2$  см, 2 -  $l = 0.25$  см, 3 -  $l = 0.3$  см, 4 -  $l = 0.4$  см); б) толщины слоя жидкости при различных значениях продольного градиента температуры (1 -  $A = 0.2$  К/м, 2 -  $A = 0.4$  К/м, 3 -  $A = 0.6$  К/м).

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-00291).*

### Библиографический список

1. Шлиомис М.И., Якушин В.И. Конвекция в двухслойной бинарной системе с испарением // Ученые записки Пермского государственного университета, серия Гидродинамика: Сб. науч. тр. - 1972. - № 4. - С. 129–140.
2. Гончарова О.Н., Резанова Е.В., Люлин Ю.В., Кабов О.А. Изучение конвективных течений жидкости и спутного потока газа с учетом испарения // ТВТ. - 2017. - Т. 55, № 6. - С. 720–732.
3. Гончарова О.Н., Резанова Е.В. Пример точного решения стационарной задачи о двухслойных течениях при наличии испарения на границе раздела // ПМТФ. - 2014. - № 2. - С. 68–79.
4. Lyulin Yu.V., Kabov O.A. Evaporative convection in a horizontal liquid layer under shear-stress // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 2014. - N. 70. - P. 599–609.
5. Бирих Р.В. О термокапиллярной конвекции в горизонтальном слое жидкости // Прикладная механика и техническая физика. - 1966. - № 3. - С. 69–72.