

УДК 538.958(075.8)

А.И. Ливашвили, В.В. Криштоп, Г.В. Костина, Т.Н. Брюханова

**ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЖИДКОСТИ,  
НАХОДЯЩЕЙСЯ В СВЕТОВОМ ПОЛЕ**

*Теоретически изучается динамика концентрации наножидкости, помещенной в световое поле с профилем интенсивности Гаусса. Исследование основано на аналитических решениях системы линеаризованных уравнений теплопроводности и конвекции-диффузии. Уравнение конвекции-диффузии содержит члены, которые соответствуют как эффекту Соре, так и переносу наночастиц, вызванному действием на них светового поля (электрострикция).*

*Ключевые слова: наножидкость, концентрация, конвекция, термодиффузия, электрострикция, волны.*

**DYNAMICS OF THE CONCENTRATION OF A NANOFUID IN A LIGHT FIELD**

*The dynamics of the concentration of a nanofluid placed in a light field with a Gaussian intensity profile is studied theoretically. The investigation is based on the analytical solutions of the system of linearized heat conduction and convection-diffusion equations. The convection-diffusion equation contains terms that correspond both to the Soret effect and to the transfer of nanoparticles, caused by the action of a light field on them (electrostriction).*

*Key words: nano-fluid, concentration, convection, thermal diffusion, electrostriction, waves.*

**Введение**

Коллоидные суспензии, или, как сейчас их принято называть, наножидкости, широко применяются в различных сферах современной технологии. Например, в химических процессах (катализе), при создании новых лекарств, смазочных материалов и т.д. С ростом производительности электронных устройств и развитием высокоэнергетических технологий возникает необходимость создания эффективных охлаждающих систем и управления большими тепловыми потоками [1, 2]. Один из способов интенсификации теплообмена – повышение теплопроводности жидкости путем добавления твердых частиц с высокой теплопроводностью. Особый интерес при создании таких суспензий представляют наночастицы [3]. В то же время физические механизмы, связанные с процессами тепломассопереноса в таких средах, на наш взгляд, требуют дополнительного исследования.

**Теоретическая модель**

В работе рассматривается жидкофазная среда с наночастицами, облучаемая световым пучком с гауссовым профилем интенсивности. В результате воздействия светового поля в среде возникают градиенты температуры и концентрации, обуславливающие процессы тепломассопереноса. Эти явления описываются системой балансных уравнений для температуры и частиц с учетом концентрационной конвекции [4], записанных в одномерном виде (без использования приближения Буссинеска):

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(C) \nabla_x T) + \alpha_0 \tilde{I}_0 \exp\left(-\frac{x^2}{x_0^2}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla_x^2 C - v \nabla_x C + D_T \nabla_x (C(1-C) \nabla_x T) - \gamma \frac{\partial}{\partial x} \left( C \frac{\partial \tilde{I}}{\partial x} \right). \quad (2)$$

В уравнении теплопроводности опущено слагаемое, отвечающее за эффект Дюфура, ввиду его малости. Процессами седиментации мы также пренебрегаем. Здесь приняты следующие обозначения:  $T$  – температура среды;  $C = C(r, t) = m_0/m$  – массовая концентрация частиц ( $m_0$  – масса частиц,  $m$  – масса всей среды);  $C_p, \rho, \lambda(c)$  – теплофизические постоянные жидкости;  $\tilde{I}_0$  – интенсивность света;  $\alpha_0$  – коэффициент поглощения среды;  $D, D_T$  – коэффициенты диффузии и термодиффузии соответственно;  $v = \eta / h$  – скорость концентрационной конвекции, которую мы принимаем постоянной. При этом  $\eta$  – кинематическая вязкость;  $h$  – характерное расстояние (в нашем случае мы примем  $h \approx 10x_0$ );  $\gamma = \frac{4\pi\beta D}{\bar{c}n_{эф}kT}$ ;  $\beta$  – поляризуемость частиц;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\bar{c}$  – скорость света в вакууме;  $n_{эф}$  – эффективный показатель преломления среды.

Учтем тот факт, что процессы установления температуры идут быстрее диффузионных. Это дает возможность изучать последние на фоне стационарной температуры:  $\partial T / \partial t = 0$ . Будем рассматривать случай малых концентраций:  $C \ll 1$ .

Далее, концентрационную зависимость коэффициента теплопроводности можно представить в виде (3): подобная зависимость теоретически была получена в работе [1] и экспериментально подтверждена в [5].

$$\lambda(C) = \lambda_0 + \beta C = \lambda_0 (1 + pC), \quad (3)$$

где  $p = \frac{\beta}{\lambda_0} > 1$ .

После проведения линеаризации  $C(x, t) = C_0 + \Delta C(x, t) = C_0 (1 + C'(x, t)) = C_0 u(x, t)$ , получим задачу:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = b \frac{\partial^2 u}{\partial \rho^2} - Pe b \frac{\partial u}{\partial \rho} + (q(1 - \rho^2) - 1) \exp(-\rho^2) u, \quad (4)$$

$$u(\rho, 0) = \exp(-\rho^2), \quad \frac{\partial u(\rho, \tau)}{\partial \rho} = 0, \quad 0 \leq \rho < \infty, \quad 0 \leq \tau < \infty, \quad (5)$$

где  $\tau = \frac{S_T \alpha_0 \tilde{I}_0 D}{\lambda_0} \cdot (1 - pC_0) \cdot t$ ,  $\rho = \frac{x}{x_0}$ ,  $\rho = \frac{x}{x_0}$ ,  $Pe = \frac{vx_0}{D}$  – число Пекле,  $q = \frac{4\gamma \tilde{I}_0}{D} b$ ,

$$b = \frac{\lambda_0}{S_T \alpha_0 \tilde{I}_0 (1 - pC_0) x_0^2}.$$

Найти точное аналитическое решение уравнения (4) с начально-краевыми условиями (8) не представляется возможным. Оценка числа Пекле при типичных значениях величин в нашем случае дает не менее  $10^3$ . Это значение указывает на преобладание процессов конвекции над молекулярной диффузией. С учетом этого факта, перепишем задачу (4)-(5) в укороченной форме:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = Pe b \frac{\partial u}{\partial \rho} + (q(1 - \rho^2) - 1) \exp(-\rho^2) u. \quad (6)$$

Ее точное решение можно записать в виде числа Пекле:

$$u(\rho, \tau) = A \exp[-(\rho - Pe b \tau)^2] \exp\left\{ \frac{1}{4Pe b} [\sqrt{\pi} (q - 2) \operatorname{erf}(\rho) + 2q \rho \exp(-\rho^2)] \right\}, \quad (7)$$

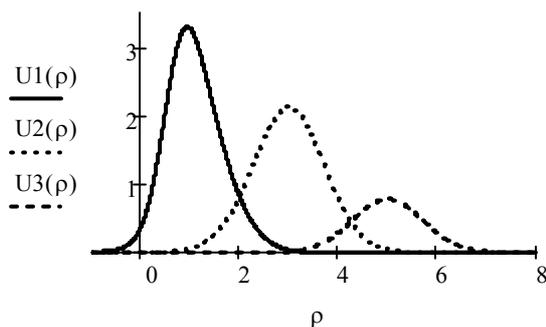


Рис. 1. Графики решения  $u(\rho, \tau)$ , представленные для различных моментов времени (по мере возрастания временной переменной  $\tau$ ).

где  $erf(\rho)$  – функция ошибок (Гаусса). Постоянную  $A$  можно определить из условия сохранения числа частиц в системе. Примечательно, что скорость волнового фронта совпадает с заданной скоростью концентрационной конвекцией.

На рис. 1 приведены графики функции  $u(\rho)$  при возрастающих моментах времени.

### Заключение

Таким образом, учет концентрационного конвективного потока даже в одномерном приближении, приводит к модулированным по амплитуде затухающим по времени бегущим волнам. Заметим, что пространственная структура амплитуды существенно зависит от знаков коэффициентов  $C_0$ ,  $P_e$  и поляризации, что, в свою очередь, связано с природой частиц. Этот факт требует дополнительного исследования, что и будет предметом наших дальнейших исследований.

Заметим, что пространственная структура амплитуды существенно зависит от знаков коэффициентов  $C_0$ ,  $P_e$  и поляризации, что, в свою очередь, связано с природой частиц. Этот факт требует дополнительного исследования, что и будет предметом наших дальнейших исследований.

1. Рудяк, В.Я., Белкин, А.А. Моделирование коэффициентов переноса наножидкостей // Наносистемы: Физика, Химия, Математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 156-177.
2. Jun, Q., Tao, F., Qiuqiang, Z., Sailing, H. Using some nanoparticles as contrast agents for optical bioimaging // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2010. – V. 16(3). – P. 672.
3. Introduction: The Emergence of Nanoparticles as Imaging Platform in Biomedicine. / J.W. Bulte, M.M. Modo. – Heidelberg: Springer, 2008. – V. 102.
4. Гроот, С. де, Мазур, П. Неравновесная термодинамика. – М.: Мир, 1964. – 456 с.
5. Shawn, A, Putnam, David G., Cahill, Paul V. Braun Thermal conductivity of nanoparticle suspensions // Journal of applied physics. – 2006. – V. 99. – P. 084308.