

УДК 536.25

Авраменко А.А.<sup>1</sup>, Блинов Д.Г.<sup>1</sup>, Кузнецов А.В.<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины<sup>2</sup>Университет штата Северная Каролина, США

## ТЕЧЕНИЕ НАНОЖИДКОСТЕЙ В КАНАЛАХ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМЫ

Проведено числовий аналіз течії нанорідини в каналах криволінійної форми. Показана можливість інтенсифікації теплообміну шляхом додавання наночасток в основний теплоносій.

Численно проанализировано течение наножидкости в каналах криволинейной формы. Показана возможность интенсификации теплообмена путем добавления наночастиц в основной теплоноситель.

The flow of nano-fluids in a wavy channel has been numerically investigated. The possibility of enhancement of heat transfer by added nano-particles in base fluids is shown.

$A$  – амплитуда изгиба канала;

$a$  – амплитудная функция;

$C_f$  – коэффициент трения;

$H$  – ширина канала;

$L$  – шаг изгиба канала;

$Pr = (\mu_f \cdot C_f) / \lambda_f$  – число Прандтля;

$Re = (U_{av} \cdot H) / \lambda_f$  – критерий Рейнольдса;

$T_{in}$  – средняя температура во входном сечении;

$T_w$  – температура стенки канала;

$U_{av}^w$  – средняя скорость течения в канале;

$x, y$  – координаты;

$\phi$  – объемная концентрация наночастиц;

$\psi$  – пространственная базисная функция.

**Индексы:**

$f$  – чистая жидкость;

$nf$  – наножидкость;

$p$  – наночастицы.

**Введение**

За последние годы прогресс в области электронных и оптических устройств, появление электрогенерирующего и транспортно-оборудования нового поколения обострили проблему эффективного отвода тепловых потоков значительной плотности. Так, если первые процессоры Intel генерировали порядка 0,3 Вт/см<sup>2</sup>, то современные компьютерные процессоры – свыше 150... 200 Вт/см<sup>2</sup>. Такое значительное увеличение тепловой напряженности привело к тому, что традиционные охлаждающие системы, основанные на вынужденной конвекции и оребрении поверхности, больше не соответствуют выдвигаемым требованиям по теплоотводу [1]. Прогресс в развитии оборудования настоятельно требует адекватного прогресса в системах охлаждения.

К перспективным путям повышения теплоотдающих характеристик охлаждающих устройств можно отнести: применение новых теплоносителей и использование более эффективных схем охлаждения. В настоящее время в области новых теплоносителей много-

обещающим направлением является применение наножидкостей, представляющих собой смесь стандартных теплоносителей (вода, масло, этиленгликоль) с частицами наноразмера (меньше 100 нм) [2-3]. Добавление незначительного, порядка нескольких процентов частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO и ряда других, приводит к резкому изменению теплофизических свойств смеси. Коэффициент теплопроводности возрастает на 20...30 %, что превышает значения, рассчитанные по традиционным соотношениям для смеси. При этом в отличие от обычных смесей наножидкость отличается стабильностью, отсутствием эрозии, засорения и закупоривания каналов при ее использовании.

Также эффективным способом повышения теплоотдачи является применение новых технических решений, таких как использование криволинейных каналов. Хорошо известный факт, что при течении жидкости вдоль искривленной поверхности генерируются вторичные течения (вихри Дина) [4], которые приводят к улучшению смешения вдоль поверхности и, как следствие, – улучшение теплообмена. Ка-

налы такой формы представляют собой пример конструктивного решения, позволяющего достичь улучшения условий теплообмена путем генерирования вторичного течения и дестабилизации основного потока жидкости. Причиной вторичного течения является небаланс между центробежными силами и силами радиального давления. Индуцирование вихревых структур в изгибах канала вызывает движение жидкости от стенки к центру основного потока и приводит к разрушению и утончению пограничного слоя. Такого рода механизм был исследован во многих работах [5-7]. Было показано, что вихри Дина и более сложные вертикальные потоки значительно улучшают теплообмен по сравнению с прямыми каналами, при этом увеличение гидравлического сопротивления меньше чем улучшение теплоотдачи.

В данной работе рассмотрена задача, объединяющая обе перспективные технологии улучшения теплообмена: использование наножидкостей и искривленных каналов.

Объяснению резкого увеличения коэффициента теплопроводности наножидкостей посвящено множество работ [8, 9], в которых предложены различные физические механизмы: от учета погранслоя вокруг частиц, дополнительного вращения частиц, броуновского движения до принятия во внимание кластеризации наночастиц. Однако, до настоящего времени нет общепринятой трактовки изменения свойств наножидкостей.

При рассмотрении задач теплообмена необходимо рассматривать все теплофизические свойства в комплексе, включая вязкость и теплоемкость, так как на коэффициент теплоотдачи оказывает влияние кроме, непосредственно, теплопроводности также и структура течения, толщина погранслоя и другие характеристики потока. Поэтому в ряде работ, несмотря на увеличение коэффициента теплопроводности, отмечается ухудшение теплопередающих свойств [10].

Как уже говорилось, в настоящей работе рассматривалось вынужденное течение наножидкости в криволинейном канале. Числен-

ным и экспериментальным исследованиям вынужденной конвекции посвящено несколько работ [11-13], в которых отмечается увеличение коэффициента теплоотдачи. Рассмотренная в работе задача требует отдельного исследования ввиду особого характера течения, включающего в себя образование вторичных течений. В этой связи на теплопередающие характеристики кроме, непосредственно, коэффициента теплопроводности значительное влияние может оказать изменение вязкости наножидкости.

### Постановка задачи

Рассмотрим движение наножидкости в канале волнообразной формы (рис. 1).

Несмотря на наличие относительного проскальзывания наночастиц по отношению к основной жидкости, при расчетах большинство работ предполагает рассмотрение наножидкости как однородную гомогенную смесь [8-13], при этом само влияние относительной скорости и связанное с этим броуновское движение учитывается в эмпирических коэффициентах для свойств наножидкости. Учет влияния концентрации производится простым пересчетом средних свойств жидкости без учета реального распределения концентрации наночастиц.

Система уравнений, соответствующая движению наножидкости в гомогенном приближении, имеет вид:

$$\begin{aligned} u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \cdot \Delta^2 u, \\ u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \cdot \Delta^2 v, \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= a_{nf} \Delta^2 T. \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим задачу в периодических граничных условиях во входном и выходном сечении:

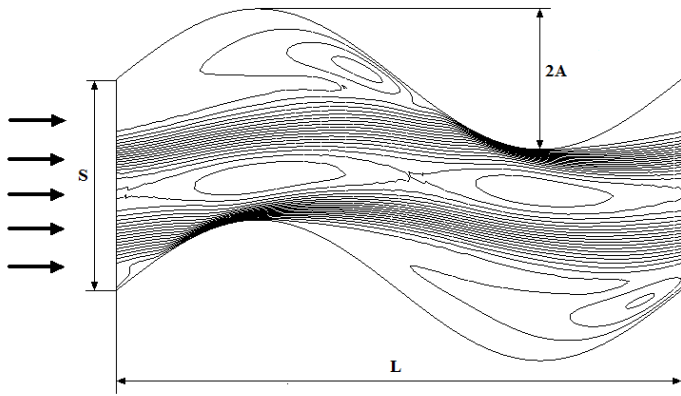


Рис. 1. К постановке задачи.

$$T(y,0) = T(y,L), u(y,0) = u(y,L), v = (y,L),$$

$$\int_0^H u(0,y)dy = U_{av}, \int_0^H T(0,y)dy = T_{in}.$$

На боковых стенках

$$u = 0, v = 0, T = T_c \text{ при } y = S(x), \quad (2)$$

где  $S(x)$  описывает границу канала.

Уравнения (1) должны быть дополнены замыкающими соотношениями для теплофизических свойств [8-13]

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}, \rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p,$$

$$\rho_{nf}c_{nf} = (1-\phi)(c\rho)_f + \phi(c\rho)_p,$$

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left[ \frac{\lambda_p + 2\lambda_f + 2\phi(\lambda_p - \lambda_f)}{\lambda_p + 2\lambda_f - \phi(\lambda_p - \lambda_f)} \right], \quad (3)$$

где  $\phi$  – концентрация наночастиц.

В качестве наножидкости выбрана вода с частицами  $Al_2O_3$  (смотри табл. 1)

Характеристики потока определялись по критериям  $Nu, Re, C_f$ :

Таблица 1. Физические свойства чистой жидкости (воды) и наночастиц

Свойства	Вода	$Al_2O_3$
$\rho$ , (кг/м <sup>3</sup> )	998,2	3600
$\lambda$ , (Вт/м/К)	0,613	46
$c$ , (Дж/кг)	4179	765
$\mu$ , ((Па·с))	0,01	

$$Nu_s = \alpha H \lambda_{nf}, \alpha = \lambda_{nf} (\partial T / \partial n) / (T_w - T_{in}),$$

$$Nu = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_s ds, Re = U_{av} H / \lambda_{nf}, C_f = \int_0^L \frac{2\tau_w}{\rho_{nf} U_{av}^2} ds,$$

$$\tau_w = \mu_{nf} (\partial u / \partial x + \partial v / \partial y)_{y=S(x)}.$$

Для более удобного анализа результаты расчетов (гидродинамические и температурные поля) были обработаны с помощью процедуры ортогональной декомпозиции POD [14]. На характеристики теплообмена и гидродинамики в данной постановке оказывают влияние средняя скорость потока на входе и концентрация наночастиц. Качественное подобие гидродинамических и тепловых полей при различных параметрах позволяет построить для обработки и анализа данных маломодовую аппроксимацию (на основе метода POD).

Было выбрано аппроксимационное приближение вида

$$V_N = \sum_{i=1}^N a_i(\phi, Re) \psi_i(x, y), \quad (4)$$

где под  $V$  понимаются поля температур и компонент скорости.

Метод POD позволяет выявить такой вид пространственного базиса  $\{\psi_i\}$  и амплитудных функций  $\{a_i\}$ , которые отражают основные особенности течения.

### Результаты и выводы

Система (1) с граничными условиями (2) и дополнительными соотношениями (3) была промоделирована с помощью пакета Fluent. Вычисления были сделаны для чисел  $Re$  в диапазоне  $[0...1000]$  и концентрации в диапазоне  $[0...0,3]$ . Для верификации расчетов полученные значения средних чисел  $Nu$  и  $C_f$  сравнивались с имеющимися в литературе для чистой воды [15] ( $\phi = 0$  соответствует чистой жидкости), было отмечено удовлетворительное совпадение результатов.

Основной задачей исследования являлось изучение влияния изменения концентрации наночастиц на тепловые характеристика течения. Как следует из формулы для  $Nu$ , на коэффициент теплопередачи оказывает влияние непосредственно коэффициент переноса и

кривизна профиля температуры (а значит и пристеночный градиент). Аналогично для коэффициента трения такими факторами являются вязкость и градиент скорости. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента теплопроводности, плотности и динамической вязкости от объемной концентрации наночастиц (построенные на основе соотношений (3)). На рис. 3 приведена зависимость нормированного по отношению к чистой жидкости пристеночного градиента температуры и градиента скорости (построенные на основе расчетов

по системе (1)) от концентрации. Как видно, с увеличением концентрации коэффициенты переноса растут, а соответствующие градиенты температурного и скоростного поля падают. В противоборстве этих двух тенденций более весомой оказывается первая, что и приводит к увеличению средних  $Nu$  и  $C_f$ . Этот факт иллюстрирует рис. 4 и рис. 5. При этом отметим, что улучшение теплопередающих свойств ( $Nu$ ) оказывается более значительным чем увеличение затрат на прокачку наножидкости (связанное с  $C_f$ ).

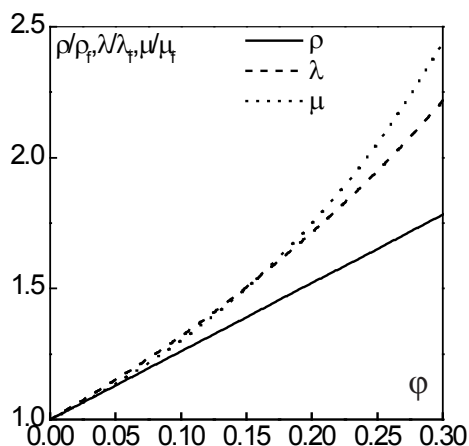


Рис. 2. Зависимость свойств наножидкости от концентрации наночастиц.

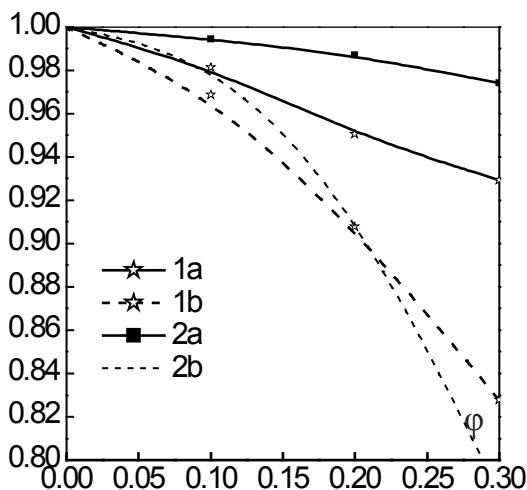


Рис. 3. Нормированный градиент температуры – 1; и градиент скорости – 2; а –  $Re = 100$ , b –  $Re = 1000$ .

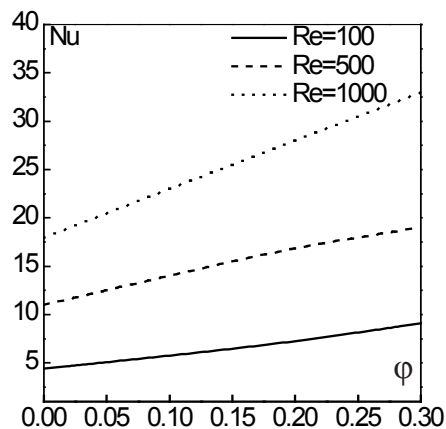


Рис. 4. Зависимость среднего  $Nu$  от концентрации наночастиц.

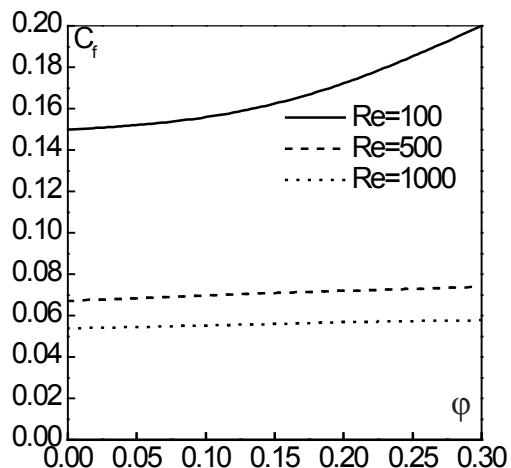


Рис. 5. Зависимость среднего  $C_f$  от концентрации наночастиц.



**Заключение**

В статье проанализировано течение наножидкости в криволинейном канале. Было отмечено, что кроме непосредственного влияния на коэффициенты переноса добавление наночастиц приводит к изменению крутизны пристеночного профиля температуры и скорости. Увеличение концентрации наночастиц приводит к увеличению среднего числа Nu и менее значительному увеличению коэффициента трения  $C_f$ .

Исследования выполнены при финансовой поддержке NATO Collaborative Linkag Grant (CBP. NUKR.CLG 984260).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Tuckerman D.B., Pease, R. F. W.*, High Performance Heat Sinking for VLSI // IEEE Electron Device Letters.– 1981. – V.2. – P. 126–129.
2. *Kebblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S. Eastman*, Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1981.– V.45. – P. 855.
3. *Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S.* Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements // Heat Transfer Engineering.– 2008.– V. 29. – P. 432.
4. *Аврамко А.А.* Теплообмен и гидродинамика около вогнутых поверхностей с вторичными течениями // Автореферат дис. докт. техн. наук. – 1997. – Киев, 34 с.
5. *Webb R. L.* Principles of Enhanced Heat Transfer // Wiley. – 1994. – New York. – P. 87–124.
6. *Sparrow E.M., Comb J.W.* Effect of Interwall Spacing and Fluid Flow Inlet Conditions on a Corrugated Wall Heat Exchanger // Int. J. Heat Mass Transfer– 1983. – V. 26. – P. 993–1005.
7. *Gyves T. W., Irvine T. F., Lamina Jr.* Conjugated Forced Convection Heat Transfer in Curved Rectangular Channels // Int. J. Heat Mass Transfer– 2000.– V. 43. – P. 3953–3964,
8. *Buongiorno J.*, Convective Transport in Nanofluids // ASME Journal of Heat Transfer.– 2006. –V.128. – P 240.
9. *Das S.K., Choi S.U.S., Patel E.H.*, Heat Transfer in Nanofluids– A Review // Heat Transfer Engineering– 2006.– V. 27(10). – P. 3–19.
10. *Yu W., France M.D., Routbort J.L., Choi S.U.S.* Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements // Heat Transfer Engineering. – 2008, V.29(5). – P. 432–460.
11. *Kakac S., Pramuanjaroenkij A.* Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009.– V. 52. – P. 3187–3196
12. *Lotfi R., Saboohi Y., Rashidi A.M.* Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches // International Communications in Heat and Mass Transfer.– 2010. – V. 37. – P. 74–78.
13. *Maiga S.E.B., Palm S.J., Nguyen C.T., Roy G., Galanis N.* Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows // Int. J. Heat and Fluid Flow.– 2005.– V. 26. – P. 530.
15. *Sui Y., Teo C.J., Lee P.S., Chew Y.T., Shu C.*, Fluid flow and heat transfer in wavy microchannels // Int. J. Heat Mass Trans. – 2010. – V. 53. – P. 2760 – 2772.

Получено 29.03.2012 г.