

Downstream of Spherical and Cylindrical Dimple on a Flat Plate at Low Reynolds Numbers // ASME Paper No GT2004-53656. 2004.

15. *Khalatov A.A., Byerley A., Seong-Ki Min & Vincent R.* Application of Advanced Techniques to Study Fluid Flow and Heat Transfer Within and Downstream of a Single Dimple // *Материалы 5-го Международного форума по тепло- и массообмену. Минск: Изд-во ИТМО АНБ. – 2004. – С. 1–20 (англ.)*.

16. *Wighart K.* Erhöhung des Turbulenten Reibungswiderstandes Durch Oberflächen-Störungen // *Forschungshefte für Schiffstechnik – 1953. – No 1. – pp. 65–81.*

17. *Hiwada M., Kawamura T., Mbuch J., & Kumada M.* Some Characteristics of Flow Pattern and Heat Transfer Past a Cylindrical Cavity // *Bulletin of JSME. – 1983. – Vol. 26. – No 220. – pp. 1744–1758.*

18. *Kovalenko G.V., Khalatov A.A.* Fluid Flow and Heat Transfer Features at a Cross-Flow of Dimpled Tubes in a Confined Space // *ASME Paper No GT2003-38155. 2003.*

19. *Isaev S.A., Leont'ev A.I., Zhdanov V.I.* Simulation of Tornado-Like Heat Transfer at Flow Passing a Relief with Dimples // *Heat Transfer-2002. – Proceedings of 12th International Heat Transfer Conference. Grenoble, France. – pp. 735–738.*

20. *Ligrani P.M., Oliveira M.M., Blaskovich T.* Comparison of Heat Augmentation Techniques // *AIAA Journal. – 2003. – Vol. 41. – No 3. – pp. 337–362.*

21. *Ligrani P.M., Harrison J.L., Mahmood G.I., Hill M.L.* Flow Structure due to Dimple Depression on a Channel Surface // *Physics of Fluids. – 2001. – Vol.13. – No11. – pp. 3442–3451.*

22. *Burgess N.K., Ligrani P.M.* Effects of Dimple Depth on Nusselt Numbers and Friction Factors for Internal Cooling in a Channel // *ASME Paper No GT2004-54232. 2004.*

23. *Coleman H., Steele G.* Experimentation and Uncertainty Analysis for Engineers. -John Wiley & Sons. New York, NY. 2d Edition. – 1999. – 275p.

*Получено 13.07.2006 г.*

УДК 629.12.03

**БАСОК Б.И., РЫЖКОВ С.С.**

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ ПЛОСКОГО КАНАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСПЕРСНОГО ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА

Виконано розрахунок основних теплофізичних та гідродинамічних характеристик дисперсного двофазного середовища для гладкого каналу в тривимірній постановці. Встановлено відсутність впливу перепаду температур до 80 °C на розподіл швидкості, кінетичної енергії турбулентності і статичного тиску та встановлено вплив на концентрацію дисперсної фази двофазного середовища в каналі. Основне зниження концентрації дисперсної фази двофазного середовища (більше 95 %) відбувається за рахунок осадження часток на верхній і нижній стінках каналу. Осад-

Вполнен расчет основных теплофизических и гидродинамических характеристик дисперсной двухфазной среды для гладкого канала в трехмерной постановке. Установлено отсутствие влияния перепада температур до 80 °C на распределение скорости, кинетической энергии турбулентности и статического давления, и установлено влияние на концентрацию дисперсной фазы двухфазной среды в канале. Основное снижение концентрации дисперсной фазы двухфазной среды (более 95 %) происходит за счет осадения частиц на верхней и нижней

Research of main thermalphysic and hydrodynamic characteristics of disperse dysphasic environment for the flat 3-D channel has been executed. Temperature drop –up to 80 °C do not influence on velocity distribution, Turbulent kinetic energy, static pressure but influence on concentration of disperse dysphasic environment in the channel. Main concentration decrease of disperse dysphasic environment (up to 95%) happens with the help of particles sedimentation on the up and down channel walls. Sedimentation on the back wall could not be taken into consideration and it is pos-

ження часток на бічній стінці можна не враховувати й використовувати двомірну модель каналу.

стенках канала. Осаждение частиц на боковой стенке можно не учитывать и использовать двухмерную модель канала.

sible to use two-dimensional channel model.

$C_{вых}$  – выходная концентрация аэрозоля;  
 $G$  – удельный массовый поток частиц;  
 $K$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $P$  – давление;

$T$  – температура;  
 $U$  – скорость;  
 $X, Y, Z$  – координаты;  
 $\eta_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент улавливания частиц.

### Введение

В настоящее время особо актуальной является проблема энергоресурсосбережения. Разработка методов интенсификации переноса дисперсной фазы в элементах тепломассообменного оборудования позволяет снизить его габариты и экономить энергетические и материальные ресурсы. Для осуществления методов интенсификации переноса массы необходимо исследовать гидродинамические и теплофизические характеристики дисперсных двухфазных потоков.

### Методы исследований

Исследования проводились с помощью программного моделирования на основе разработан-

ной для расчета теплофизических и гидродинамических характеристик дисперсного двухфазного неизотермического потока модели с использованием уравнения напряжений Рейнольдса [1]. Расчетная сетка канала строилась с помощью прямоугольных сегментов, формирующих множество кубов, и имела следующую геометрию: длина  $X = 200$  мм, высота  $Z = 10$  мм, ширина  $Y = 50$  мм (рис. 1).

Пространственный канал представляет собой элемент устройства для улавливания дисперсной фазы из дисперсионной среды в виде плоской трехмерной струи, вытекающей из щели толщиной 10 мм и разворачивающейся на 90 градусов. Подобные элементы используются в импакторах для измерения дисперсного состава частиц [2] и в качестве ступеней газоочистных устройств [3].

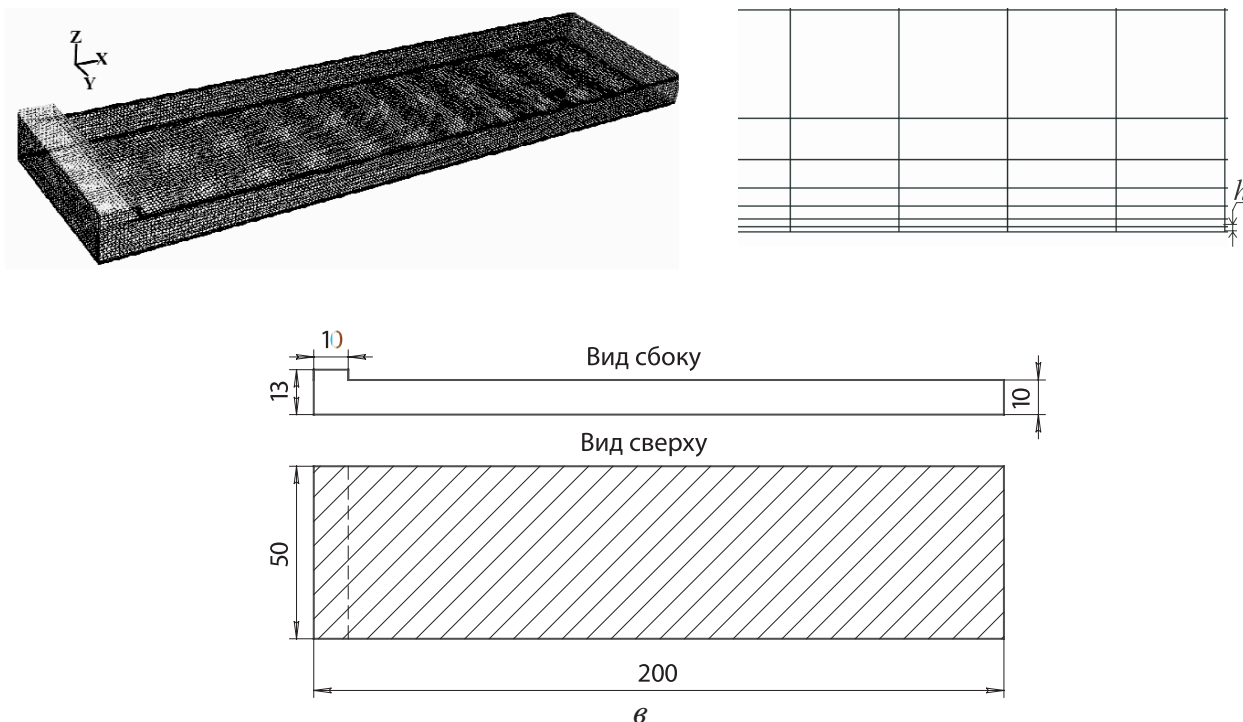
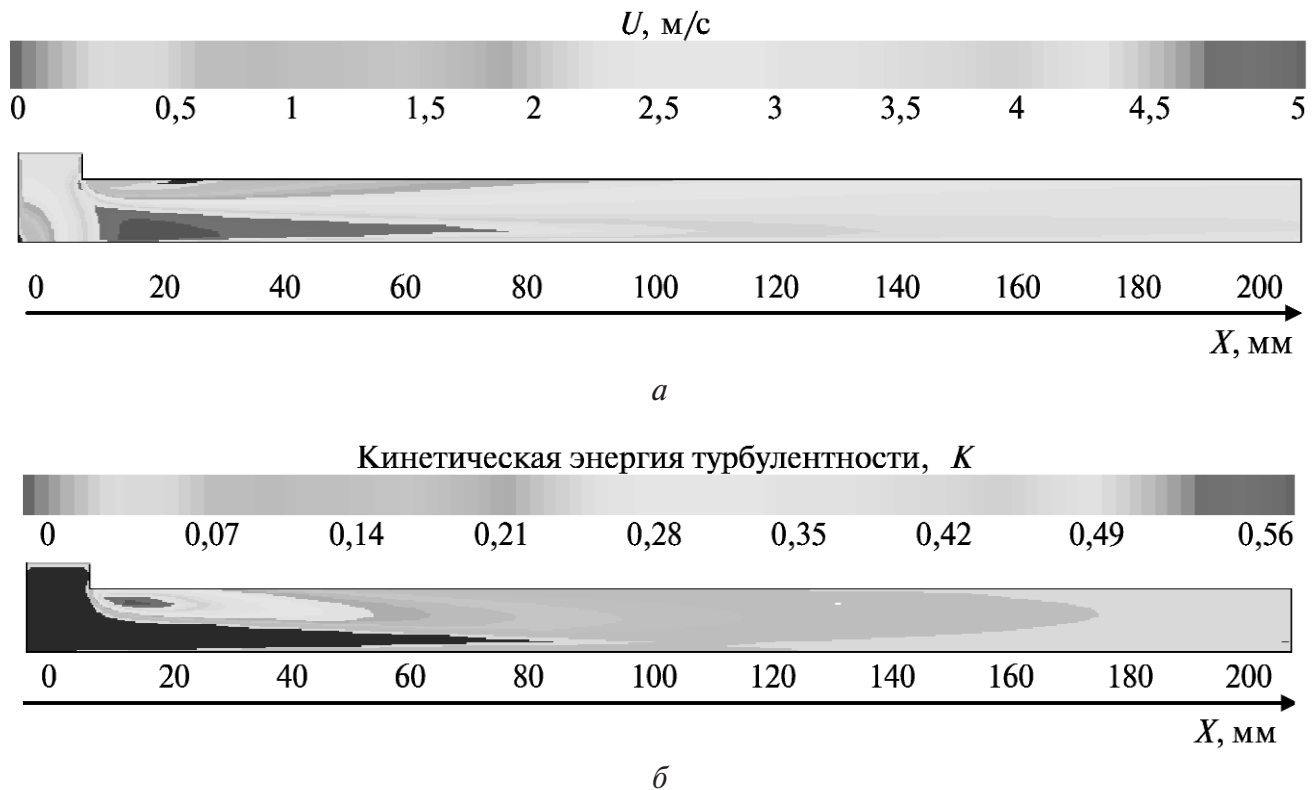


Рис. 1. Схема плоского канала. а – 3-D модель сетки; б – пристенный слой сетки; в – геометрия канала.



**Рис. 2. Гидродинамические и теплофизические характеристики в трехмерном плоском канале в цветовой цифровой гамме при начальной скорости  $U_0 = 3 \text{ м/с}$ . Обозначения: а – распределение скорости в канале; б – распределение кинетической энергии турбулентности  $K$ .**

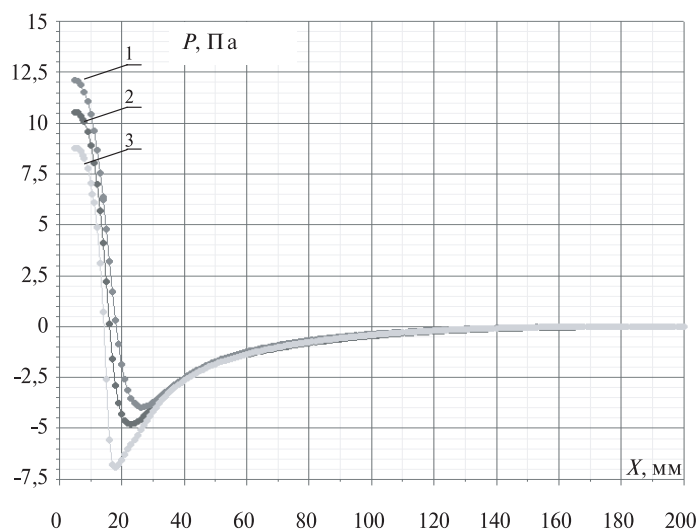
Для повышения точности расчетов кубические сегменты имели очень маленькую площадь  $S = 125 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3$ . Пристенный слой на поверхности канала в разностной сетке был смоделирован с помощью прямоугольных сегментов так, что высота каждого прямоугольника пропорционально уменьшалась к стенке (рис. 1). Высота ближайшего к стенке сегмента составляла  $h = 0,005 \text{ мм}$ , что позволяло делать расчеты с необходимой точностью. Представление результатов расчета для плоского гладкого канала проводили по аналогии с исследованиями цилиндрического [1]. Входная температура двухфазной среды принималась  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , а стенок канала  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Это обеспечивало перепад температур  $\Delta T$  до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Входная концентрация дисперсной фазы (аэрозольных частиц) составляла  $100 \text{ мг/м}^3$ , расчетный минимальный диаметр частиц  $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , а максимальный  $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ . Исследовался диапазон начальных скоростей от 1 до 7 м/с. Для точности расчетов в программном пакете использовался критерий сходимости  $10^{-4}$  для переменных скорости, усло-

вия неразрывности, кинетической энергии турбулентности и напряжений Рейнольдса, а для энергии –  $10^{-7}$ .

### Результаты исследований

Было исследовано влияние неизотермичности на изменение скорости в канале. Температура потока в расчетном интервале незначительно влияет на распределение полей скорости. При  $\Delta T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , как и при  $\Delta T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , скорость в центре канала остается практически одинаковой (рис.2, а).

Характерным является то, что скорость потока после разворота плоской струи в канале на расстоянии 1,5 ширины струи начинает увеличиваться по сравнению со своей начальной скоростью истечения и превышает последнюю в 1,5 раза до половины высоты канала (рис. 2, а). Это обусловлено возникновением циркуляционной зоны сразу за срезом сопла, которая прижимает основной поток и перекрывает сечение канала,

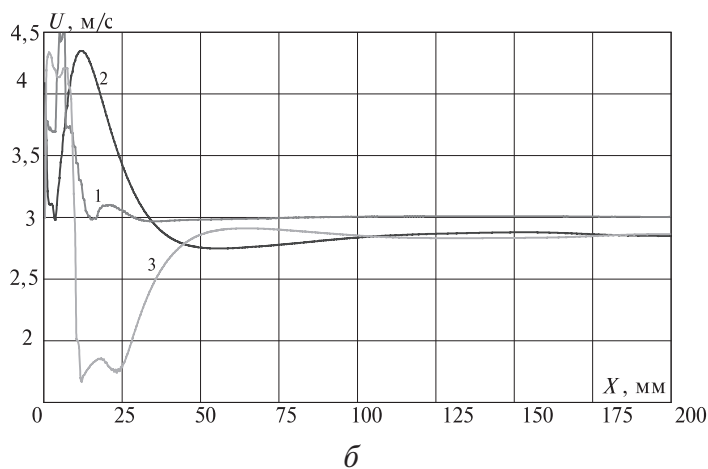
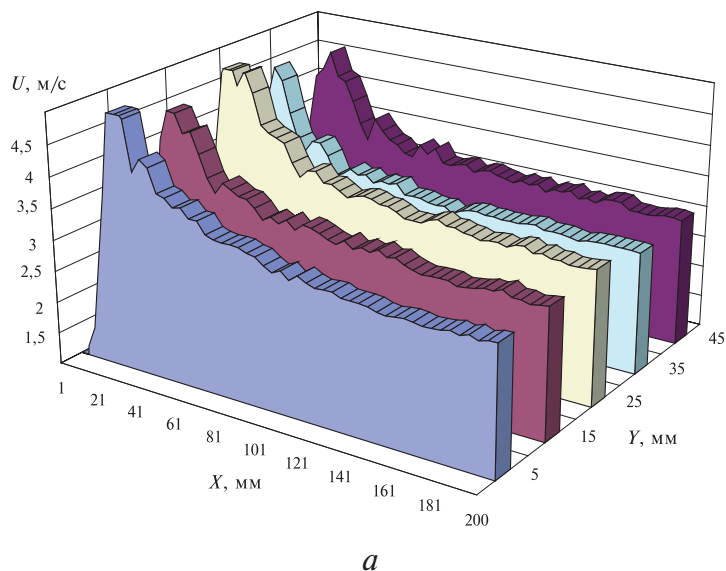


**Рис. 3.** Распределение статического давления в области пристенного течения и в центре канала при  $U_0 = 3$  м/с. Обозначения: 1 – в центре канала; 2, 3 – на расстояниях 1 мм от стенки канала.

что отмечено в исследованиях [4]. Это хорошо видно на рис. 2, а в виде зон пониженных скоростей. В дальнейшем скорость потока начинает выравниваться по длине канала.

Подтверждением вихревой зоны возле верхней поверхности сразу за срезом струи является характер распределения кинетической энергии турбулентности  $K$  (рис. 2,б). Именно в этой зоне наблюдаются повышенные значения турбулентности, которые в 4...5 раз выше, чем у нижней поверхности канала, что свойственно вихревым структурам. Также характер распределения кинетической энергии турбулентности  $K$  и распределение статического давления не зависят от исследуемого перепада температуры. Распределение кинетической энергии турбулентности  $K$  для различных скоростей обтекания имеет одинаковый характер. Максимальные значения  $K$  наблюдаются в начале канала, после разворота струи. Наличие вихревых структур в верхней части хорошо видно по зонам отрицательного статического давления (рис. 3).

Распределение статического давления в плоском гладком канале имеет одинаковый характер для разных скоростей и подобно обтеканию цилиндрического канала. Максимальное давление возникает перед поворотом струи на входе из сопла в канал.



**Рис. 4.** Изменение скорости в трехмерном плоском канале. Обозначения: а – по длине и ширине в центре канала по высоте ( $Z = 5$  мм) при начальной скорости  $U_0 = 3$  м/с; б – при  $Y = 25$  мм; 1 – в центре канала; 2, 3 – на расстоянии 1 мм от верхней и нижней стенок (см. схему на рис. 1).

На рис. 4 представлено изменение скорости по длине и ширине канала при начальной скорости  $U_0 = 3$  м/с на расстоянии 5 мм от нижней стенки канала в трехмерной постановке. При повороте струи газа и достижении 12 мм длины канала скорость потока возрастает и достигает 4,5 м/с вместо начальной 3 м/с. Это подтверждает данные расчетов для двухмерной задачи [1]. Возникающие в зоне циркуляции вихревые образования не имеют постоянных размеров и влияют на размеры проходного сечения по ширине канала, что вызывает незначительное колебание скорости.

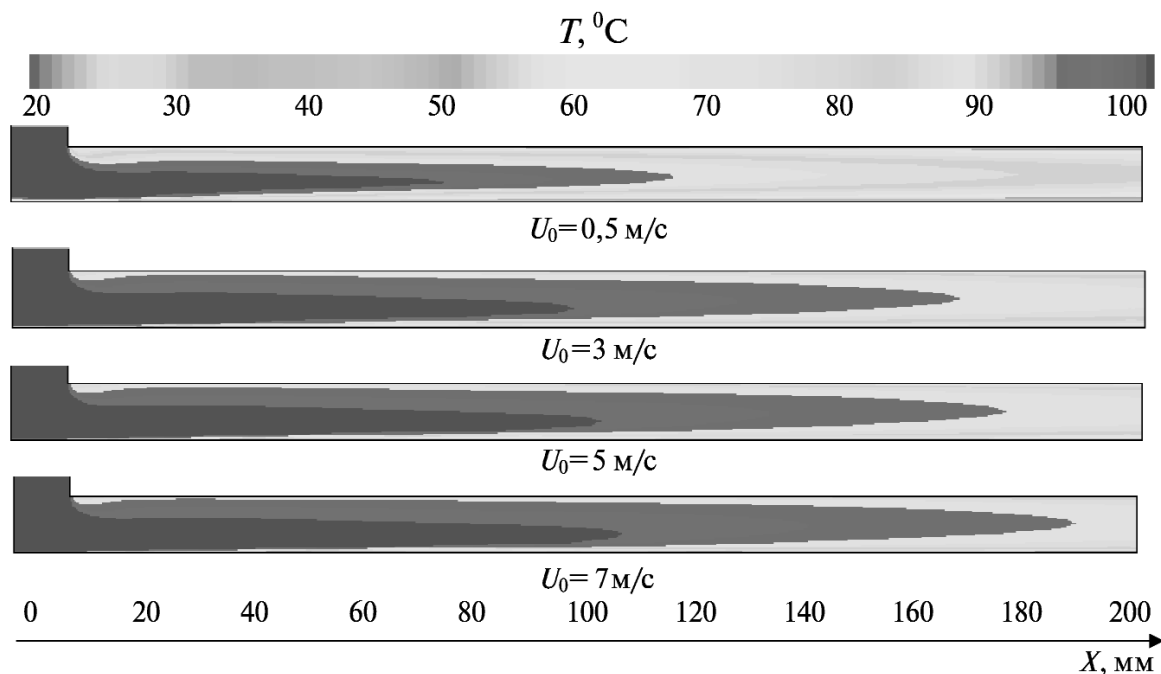


Рис. 5. Распределение температурного поля в трехмерном плоском канале в цветовой цифровой гамме при  $T_{нач} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

В дальнейшем по мере продвижения потока происходит его выравнивание по сечению с достижением начальной скорости.

Был выполнен расчет температурного поля для перепада температур  $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис. 5 представлено распределение температурного поля в канале в виде цифровой цветовой гаммы при начальных скоростях  $U_0 = 0,5; 3,0; 5,0; 7,0\text{ м/с}$ . Как видно из рис. 5, 6, распределение температурного поля в канале зависит от скорости дисперсного двухфазного потока. При  $U_0 = 0,5\text{ м/с}$  в центре канала температура уменьшается на  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при  $U_0 = 7\text{ м/с}$  – всего на  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В пристенном слое на расстоянии  $0,5\text{ мм}$  от стенки канала при  $U_0 = 0,5\text{ м/с}$  температура снижается на  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а при  $U_0 = 7\text{ м/с}$  – всего на  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Одной из характеристик дисперсной двухфазной среды является концентрация аэрозольных частиц  $C_{вблх}$ , которая изменяется при движении в канале за счет осаждения частиц под действием сил различной природы – инерции, турбофореза, термофореза, тяжести и др. Для исследования изменения концентрации дисперсной фазы двухфазного потока производился ее расчет на выходе из канала при заданной входной ( $100\text{ мг/м}^3$ ) (рис. 7).

Как показали результаты расчета, наибольшее влияние перепада температур (сил термофореза) на движение частиц дисперсной фазы наблюдается при малых скоростях. При увеличении скорости потока увеличивается влияние на дисперсную фазу инерционных и турбофоретических сил, а эффект от термофореза снижается. Увеличение скорости приводит к росту энергетических затрат и возможному вторичному уносу дисперсной фазы. Так, при  $U_0 = 1\text{ м/с}$   $C_{вблх} = 91,8\text{ мг}$  при  $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $C_{вблх} = 87,1\text{ мг}$  при среднем перепаде  $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При начальной скорости  $U_0 = 7\text{ м/с}$  неизотермичность незначительно влияет на снижение концентрации масляного аэрозоля в рабочем канале. Так, при  $\Delta T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$   $C_{вблх} = 84,0\text{ мг}$ , а при  $\Delta T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$   $C_{вблх} = 81,8\text{ мг}$ .

На рис. 8 представлено влияние скорости на удельный массовый поток частиц, направленный к стенкам  $G$ ,  $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$ . Как видно из графика, осаждение на боковую стенку составляет  $1,6\%$ . Надбавка суммарного осаждения аэрозольных частиц за счет теплового эффекта составляет на верхней стенке при  $U_0 = 1\text{ м/с}$  –  $G = 1,785 \cdot 10^{-7}\text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ , а при  $U_0 = 7\text{ м/с}$  –  $G = 0,651 \cdot 10^{-7}\text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ . На нижней стенке при  $U_0 = 1\text{ м/с}$  –  $G = 1,812 \cdot 10^{-7}\text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ , а при  $U_0 = 7\text{ м/с}$  –  $G = 0,992 \cdot 10^{-7}\text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$  соответственно.



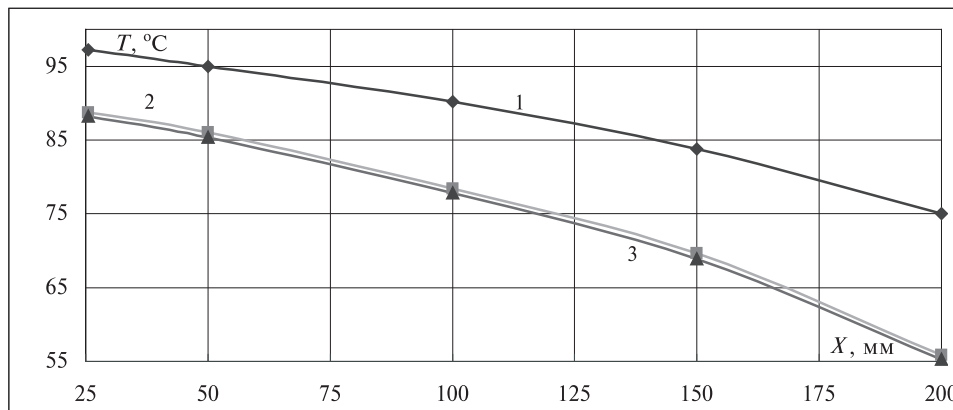


Рис. 6. Распределение температурного поля в области пристенных течений и в центре канала при начальной скорости  $U_0 = 0,5$  м/с. Обозначения: 1 – центр канала, 2, 3 – 1 мм на расстоянии от стенок.

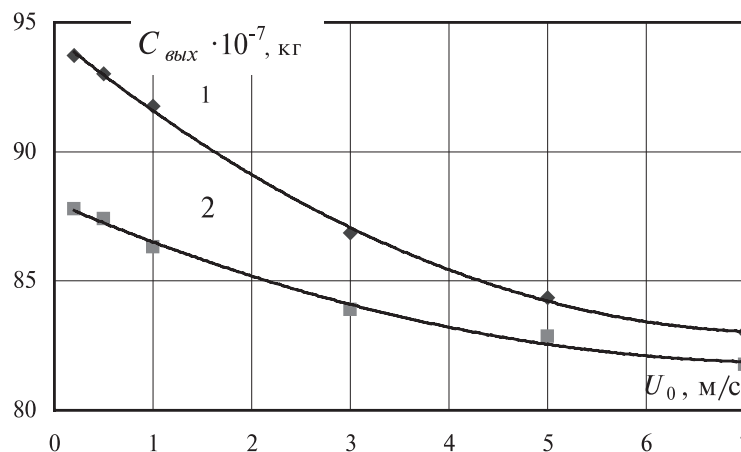


Рис. 7. График изменения концентрации дисперсной фазы на выходе из канала в зависимости от начальной скорости потока и степени охлаждения стенок. Обозначения: 1 –  $T = 0^\circ\text{C}$ , 2 –  $T = 80^\circ\text{C}$ .

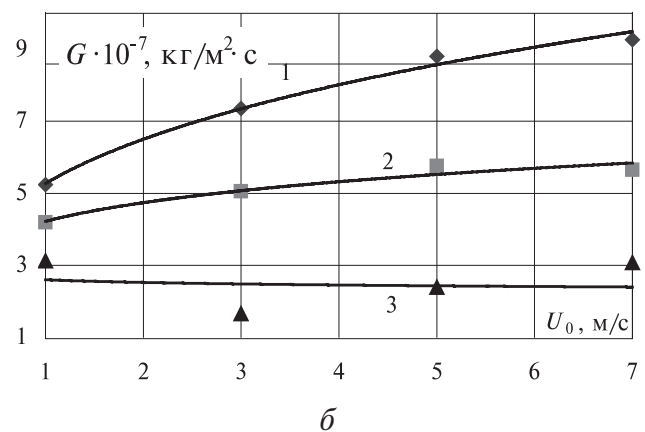
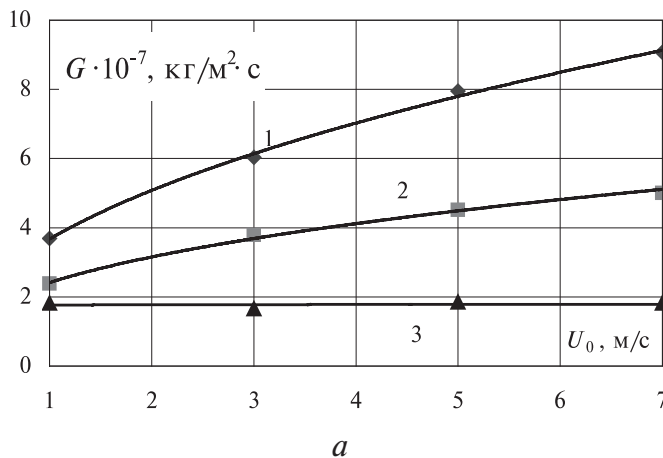


Рис. 8. Влияние скорости на удельный массовый поток частиц к стенкам  $G$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ . Обозначения: а – при перепаде температур  $T = 80^\circ\text{C}$ , б – без охлаждения, 1 – осаждение на нижнюю стенку, 2 – осаждение на верхнюю стенку, 3 – осаждение на боковую стенку.

Расчеты показали, что для исследования плоского гладкого канала возможно использование как трехмерной, так и двухмерной модели. Для упрощения расчета возможно пренебречь осаждением частиц на боковой стенке.

### Выводы

1. Выполнен расчет основных теплофизических и гидродинамических характеристик дисперсной двухфазной среды для гладкого канала в трехмерной постановке на основе созданной теплофизической модели [1].

2. Интервал перепада температур до 80 °С не влияет на распределение скорости, кинетической энергии турбулентности  $K$  и статического давления дисперсной двухфазной среды.

3. Перепад температур (силы термофореза) влияет на концентрацию дисперсной фазы двухфазной среды при ее прохождении в канале. Увеличение скорости потока повышает влияние инерционных и турбофоретических сил, а снижение – термофоретических.

4. Основное снижение концентрации дисперсной фазы двухфазной среды (более 95 %) происходит за счет осаждения частиц на верхней и нижней стенках канала. Для упрощения расчетов осаждение частиц на боковой стенке можно не учитывать и перейти к двухмерной модели канала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Басок Б.И., Авраменко А.А., Рыжков С.С. Исследование влияния температуры на процесс улавливания высокодисперсных частиц аэрозоля в гладком канале // Промышленная теплотехника. – 2005. – Т. 23, №4–5. – С. 141–145.
2. П. Райст. Аэрозоли. Введение в теорию // Мир. – 1987. – С. 34–40.
3. Ryzhkov S.S. “Jet- contact separator of exhaust gases of ship engines”/ Proceedings of the third international conference on marine industry// Varna: Bulgaria, 2001. – 2. – P. 137 – 145.
4. М. Ван-Дайка. Течение жидкости и газа / Москва. Мир. – 1986. – 114 с.
5. Рыжков С.С., Басок Б.И. Экологические ресурсосберегающие технологии для промышленной теплотехники на основе дисперсных двухфазных сред // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, №4–5. – С. 141–145.
6. Рыжков С.С., Харитонов Ю.М., Благодатний В.В. Методи очищення повітряного середовища від забруднень: Методичні вказівки. / Миколаїв: УДМТУ. – 2002. – 56 с.
7. Басок Б.И., Рыжков С.С (мл) Термофоретическая очистка воздуха в энергетическом оборудовании. // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, №5. – С. 45–50.

Получено 19.01.2006 г.

УДК 532.5: 536.24

Тыринов А.И.

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ВЕРИФИКАЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ $k$ - $\epsilon$ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ИМПАКТНОЙ СТРУЕ

У роботі проведено апробацію трьох різновидів  $k$ - $\epsilon$  моделі турбулентності: “standard”, “RNG”, “realizable”. Виконано чисельне моделювання термо- та гідродинамічних процесів, що відбуваються

В работе проведена апробация трех разновидностей  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности: “standard”, “RNG”, “realizable”. Произведено численное моделирование термо- и гидродинамических про-

The approbation of three varieties  $k$ - $\epsilon$  model of turbulence is carried out: “standard”, “RNG”, “realizable”. The numerical simulation of thermo and fluid flow processes in impact water jet is per-