

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-

при ударе водного струя в плоскую пластину. Результаты моделирования на основе моделей, которые тестируются, хорошо согласуются с результатами эксперимента. При этом тип модели слабо влияет на точность расчетов.

процессов, происходящих при ударе водной струи в плоскую пластину. Результаты моделирования на основе тестируемых моделей хорошо согласуются с результатами эксперимента. При этом тип модели слабо влияет на точность расчетных данных.

formed. There is a good agreement between numerical results and experimental data. The type of model weakly influences an accuracy of numerical data.

$a, a_t$  – молекулярная и турбулентная теплопроводности;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$  – константы в модели турбулентности;

$D$  – субстанциальная производная;

$G_k$  – генерация турбулентной кинетической энергии;

$k$  – кинетическая энергия турбулентности;

$p$  – давление;

$u, v$  – компоненты средней скорости в направлениях  $x$  и  $y$ ;

$\varepsilon$  – скорость диссипации энергии турбулентности;

$\mu, \mu_t$  – молекулярная и турбулентная вязкости;

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – турбулентные числа Прандтля для  $k$  и  $\varepsilon$ .

### Введение

Компьютерные расчеты в области термо- и гидродинамических процессов требуют значительных вычислительных ресурсов, но постоянный рост производительности персональных компьютеров дает возможность численного моделирования практически любых физических процессов. Это особенно необходимо в тех областях, где эксперимент либо весьма дорог, либо просто невозможен. “Численные” же эксперименты позволяют смоделировать подобные процессы.

Точность полученных результатов не в последнюю очередь зависит от применяемых при моделировании математических моделей.

В данной работе произведена апробация трех разновидностей  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности: “standard”, “RNG”, “realizable”. Произведено численное моделирование термо- и гидродинамических процессов, протекающих при соударении водной струи с плоской пластиной в реальном эксперименте [1].

### Эксперимент

Суть эксперимента заключается в измерении с помощью жидких кристаллов полей температур при ударе струи воды в плоскую металлическую пластину, проведенного в работе [1].

В ходе эксперимента вода с температурой 34 °C вытекала из верхнего резервуара (рис.1). Через сопло струя воды падает на плоскую пластину, находящуюся в нижнем резервуаре с водой, имеющей температуру 27 °C.

Визуализация термо- и гидродинамических процессов осуществлялась с помощью жидких кристаллов, изменяющих цвет в зависимости от температуры. Подсвеченная белым светом картина процесса с помощью видеокамеры кадром вводилась в компьютер. В результате получен набор “цветовых карт” процесса (поз. 1, рис. 2), где цвет однозначно соответствует температуре воды в данной точке. В работе также представлена температурная шкала и соответствующая ей шкала температур (поз. 2, рис. 2), позволяющая определить температуру среды в каждой точке цветовой карты.

### Обработка результатов

Для исключения субъективности в процессе определения температуры была разработана программа, позволяющая определить температуру в точке с указанными координатами. Вид окна программы показан на рис. 2.

Алгоритм работы программы следующий. После ввода координат программа определяет цвет пикселя на изображении, находящегося по указанным координатам. Затем, если цвет этой точки не черный, на калибровочной шкале цветов находится пиксель с необходимым цветом (в черных областях отсутствуют цветообразующие жидкие кристаллы или слабая освещенность). Расстояние по горизонтали от левого края до найденной точки и определяет температуру.

Расстояние между отметками 29 °C и 33 °C (4 °C) составляет 214 пикселей. Т.е. масштабный коэффициент равен  $4/214 = 0,019$  °C/пиксель.

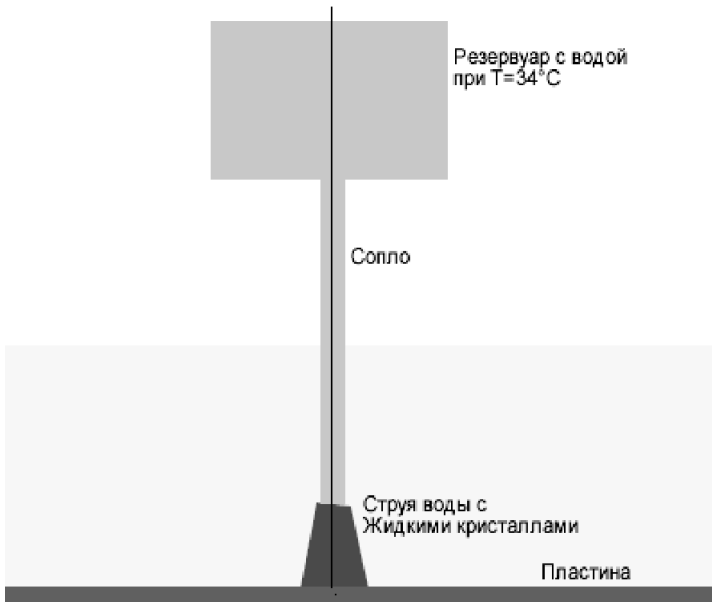


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Ограниченность количества оттенков калибровочной шкалы (всего 14 оттенков) усложняет возможность достижения однозначного соответствия цветов при сравнении. Поэтому перед сравнением программа преобразует цвета и искомой точки и калибровочной шкалы к виду “цвет” – “оттенок”. Вначале проверяется совпадение цветов, а при их совпадении сравниваются оттенки.

Для увеличения достоверности данных аналогично определяется температура еще 4-х точек, как показано на рис. 3.

После определения температуры всех значащих точек (цвет которых отличен от черного) искомая температура получается усреднением всех значащих температур.

Для каждой пары координат  $x$  и  $y$  программа последовательно определяет значения температур для пяти моментов времени: 0,3с; 0,5с; 0,75; 1,5с; 3,5с.

### Погрешность определения температуры

Погрешность определения температур программой зависит от двух параметров: ширины одноцветных участков калибровочной шкалы и ее масштабного коэффициента. Для данного случая самыми широкими “делениями” является красный участок – 30 пикселей. При масштабном коэффициенте в  $0,019\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{пиксель}$  это соответствует  $0,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Погрешность будет равна половине этого значения, т.е.  $0,285\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### Численное моделирование

При моделировании гидродинамических процессов использовались: уравнения Навье-Стокса

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right],$$

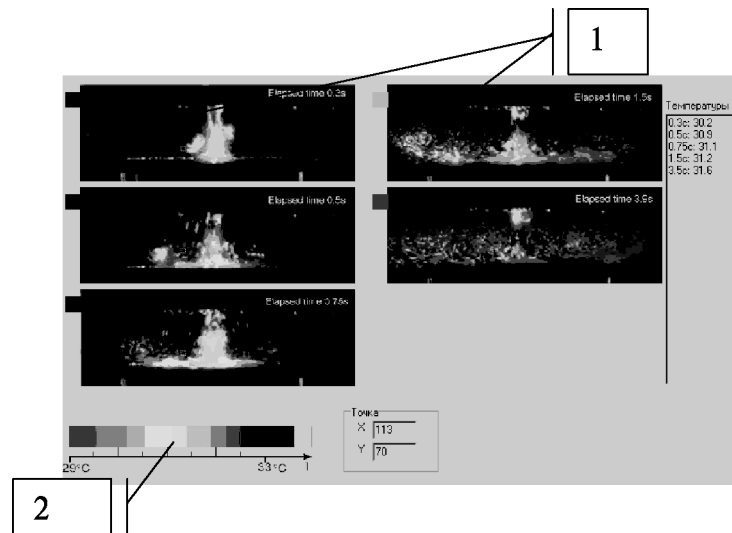
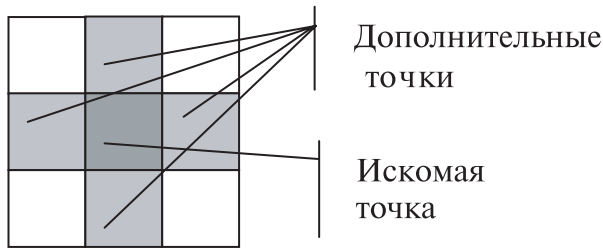


Рис. 2. Вид окна программы для определения температур.



**Рис. 3. Искомая и дополнительные точки при определении температуры**

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right],$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

уравнение энергии

$$c_p \rho \frac{DT}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ (a + a_t) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (a + a_t) \frac{\partial T}{\partial y} \right].$$

Для  $k$ - $\epsilon$  модели “standard” турбулентная кинетическая энергия  $k$  и ее скорость диссипации  $\epsilon$  вычислялись по следующим уравнениям:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

и

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k},$$

где  $G_k$  представляет собой генерацию турбулентной кинетической энергии

$$G_k = -\rho \overline{u'^2} \frac{\partial u}{\partial x} - \rho \overline{u'v'} \frac{\partial v}{\partial x} - \rho \overline{u'v'} \frac{\partial u}{\partial y} - \rho \overline{v'^2} \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Модель турбулентной вязкости  $\mu_t$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon},$$

где  $C_\mu = 0,09$ .

Уравнения для “RNG”  $k$ - $\epsilon$  модели приведены в [2], а для “realizable”  $k$ - $\epsilon$  модели – в [3].

### Результаты моделирования и их анализ

В процессе численного моделирования рассчитывались распределения температур по линии, расположенной на высоте 1 см над пластиной. За начало координат по оси  $X$  взят центр сопла. На рис. 4–8 представлены зависимости температуры  $T$  в градусах Цельсия в зависимости от  $X$ -координаты. Результаты представлены для следующих моментов времени: 0,3; 0,5; 0,75; 1,5; и 3,5 секунды.

Для момента времени 0,3 с все 3 разновидности  $k$ - $\epsilon$  модели дают сходные результаты, несколько различающиеся только в одной точке ( $x = 0,03$  м). Результаты же эксперимента заметно отличаются от результатов моделирования, хотя характер кривой совпадает. Причиной такого различия является малое количество жидких кристаллов, попавших в резервуар до данного момента времени. Этой же причиной объясняется и меньшее количество точек на кривой, соответствующей результатам эксперимента.

Момент времени 0,5 с. Результаты для всех трех моделей дают хорошие совпадения по характеру кривых. Наиболее близкие значения температуры для  $X$ -координат, лежащих в диапазоне 0,04...0,08 м получены при использовании “realizable”  $k$ - $\epsilon$  модели. Для остальных координат все три модели дают практически одинаковые результаты.

Для момента времени 0,75 с характер кривых, полученных при моделировании, заметно отличается от характера кривой, построенной по результатам эксперимента. Это можно объяснить, скорее, значительной погрешностью определе-

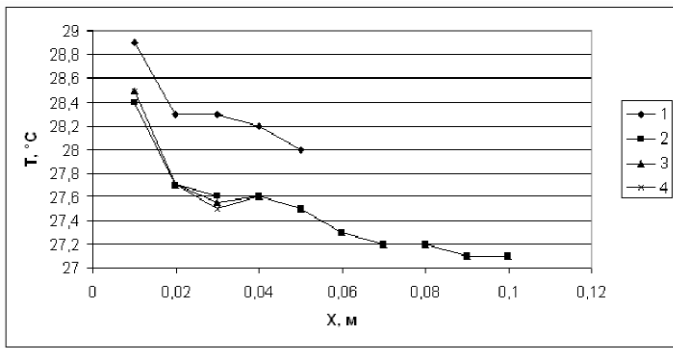


Рис. 4. Распределение температур для момента времени 0,3 с.

1 – эксперимент, 2 – “ $k$ - $\epsilon$  Standard”,  
3 – “ $k$ - $\epsilon$  RNG” и 4 – “Realizable”.

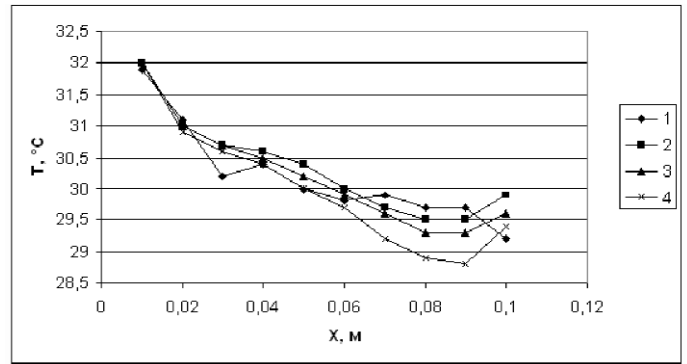


Рис. 6. Распределение температур для момента времени 0,75 с.

1 – эксперимент, 2 – “ $k$ - $\epsilon$  Standard”,  
3 – “ $k$ - $\epsilon$  RNG” и 4 – “ $k$ - $\epsilon$  Realizable”.

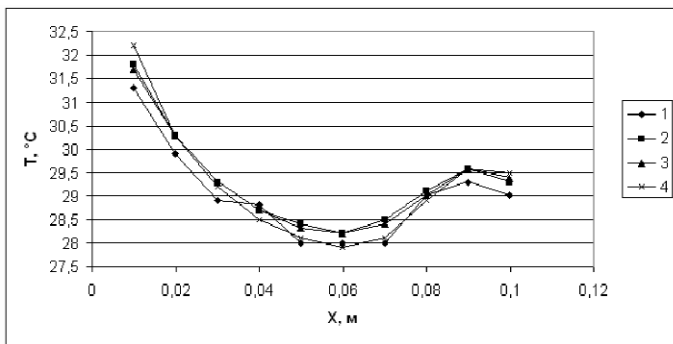


Рис. 5. Распределение температур для момента времени 0,5 с.

1 – эксперимент, 2 – “ $k$ - $\epsilon$  Standard”,  
3 – “ $k$ - $\epsilon$  RNG” и 4 – “ $k$ - $\epsilon$  Realizable”.

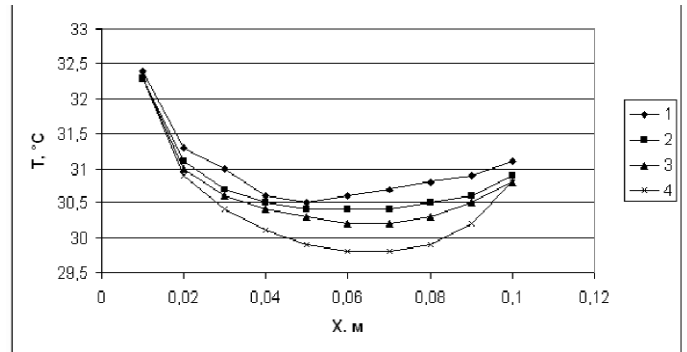


Рис. 7. Распределение температур для момента времени 1,5 с.

1 – эксперимент, 2 – “ $k$ - $\epsilon$  Standard”,  
3 – “ $k$ - $\epsilon$  RNG” и 4 – “ $k$ - $\epsilon$  Realizable”.

ния температуры по цветовым картам эксперимента. В целом же для этого момента времени наиболее близкие результаты дает “standard”  $k$ - $\epsilon$  модель.

Момент времени 1,5 с. Результаты для всех трех моделей дают хорошие совпадения по характеру кривых. Наиболее близкие значения температуры получены при использовании “standard”  $k$ - $\epsilon$  модели, хотя все три модели дают заниженные значения температур.

Результаты на момент времени 3,5 с для всех трех моделей дают неплохие совпадения по характеру кривых. Кривая, полученная при использовании “realizable”  $k$ - $\epsilon$  модели даже по характеру ближе к экспериментальной. Наиболее близкие значения температуры получены при ее же использовании, хотя все три модели дают завышенные значения температур.

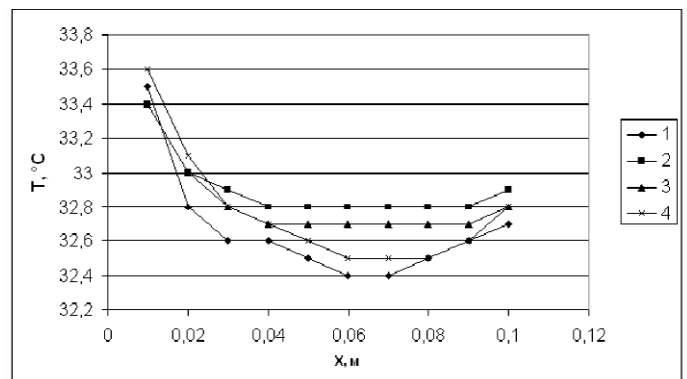


Рис. 8. Распределение температур для момента времени 3,5 с.

1 – эксперимент, 2 – “ $k$ - $\epsilon$  Standard”,  
3 – “ $k$ - $\epsilon$  RNG” и 4 – “ $k$ - $\epsilon$  Realizable”.

Заниженность и завышенность значений температур для последних двух моментов времени



вероятнее всего обусловлены погрешностями экспериментальных данных.

### Выводы

В результате проведенного моделирования и сравнения его результатов с экспериментальными данными можно отметить, что все три разновидности  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности: “standard”, “RNG”, “realizable” достаточно адекватно описывают теплообменные процессы турбулентной импактной струи. Расхождения расчетных и экспериментальных данных вызвано недостаточной точностью определения экспериментальных данных. С другой стороны, тестируемые модели не могут уловить все нюансы сложных турбулентных процессов, в том числе и возможность реверса каскадного механизма Ричардсона [4]. Поэтому по-прежнему существует необходимость теоретического исследования турбулентности на основе различных теоретических подходов, в том числе и на основе ренормгрупп [5].

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ashforth-Frost S., Rudel U.W.* Thermal and Hydrodynamic Visualisation of a Water Jet Impinging on a Flat Surface using Microencapsulated Liquid Crystals // International Journal of Fluid Dynamics, 2002, vol. 7, Article 1, 1-7.
2. *Yakhot V., Orszag S.A.* Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory // J. Sci. Comp. 1986. — 1. — N1. — P.3 — 51.
3. *Tsan-Hsing Shih, William W. Liou, Aamir Shabbir, Zhigang Yang, Jiang Zhu.* A new  $k$ - eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows // Computers Fluids, 1995, vol. 24, No. 3, pp. 227 — 238.
4. *Старп В.* Физика явлений с отрицательной вязкостью. — М.: Мир, 1971. — 260 с.
5. *Долинский А.А., Авраменко А.А., Басок Б.И., Тыринов А.И.* Ренормгрупповой подход к определению отрицательной турбулентной вязкости // Доповіді НАН України. — 2005. — 10. — С. 90 — 93.

Получено 19.01.2006 г.

УДК 536.24:532.526

РЕПУХОВ В.М.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ВЛИЯНИЕ ЗАКОНОВ ПЕРЕНОСА НА ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ УРАВНЕНИЙ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

Вивчається вплив законів переносу на одержане раніше перетворення нестационарних тримірних диференціальних транспортних рівнянь конвективного тепломасопереносу (нерозривності, переносу імпульсу, маси компоненту суміші, енергії та ін.) високошвидкісної неізотермічної та неоднорідної тримірної течії при будь-якому стані рідини до найпростішої форми рівнянь низькошвидкісної, включаючи квазіізотермічну та квазіоднорідну течію.

Изучается влияние законов переноса на рассмотренное ранее преобразование нестационарных трехмерных дифференциальных транспортных уравнений конвективного тепломасопереноса (неразрывности, переноса импульса, массы компонента смеси, энергии и другие) высокоскоростного неізотермического и неоднородного трехмерного течения при любых состояниях вещества к простейшей форме уравнений низькошвидкісного, включая квазіізотерміческое и квазіоднородное течение.

We study the influence of the transfer laws on the transformation of nonstationary three-dimensional differential transport equations of convective heat and mass transfer (continuity, momentum, component mass, energy, etc.) of a high-speed nonisothermal and inhomogeneous three-dimensional flow for any state of the substance, considered earlier, to the simplest form of equations of a low-speed flow, including quasiisothermal and quasihomogeneous ones.