

УДК 532.529

Аркадий БЕРЕЗОВСКИЙ \*, Александр КАРТУШИНСКИЙ \*\*, Анатолий МУЛЬГИ \*\*, Юло РУДИ \*\*, Сергей ТИСЛЕР \*\*, Медхат ХУСАИНОВ \*\*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ЛАМИНАРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

(Представил Ю. Энгельбрехт)

Экспериментально и теоретически исследовано распределение твердых частиц в ламинарном пограничном слое на плоской пластине. Измеренные профили концентрации характеризуются четко выраженным максимумом внутри пограничного слоя. Разработанная теоретическая модель позволяет объяснить появление этого максимума взаимодействием частиц с потоком и между собой.

Большое число технологических и природных процессов связано с движением твердых частиц в потоках газа. Это процессы горения твердых топлив в двигателях, пылеулавливание, пневмотранспорт, рассеяние примеси в атмосфере. К числу такого рода процессов относится и движение в запыленной марсианской атмосфере аэростата, запуск которого планируется в рамках международного проекта «Марс-94/96» (в сотрудничестве с учеными России и Франции). Определение величины осаждения марсианской пыли на поверхность аэростата имеет решающее значение для прогнозирования безопасности его функционирования. Для того чтобы сделать надежную оценку этого осаждения, необходимо хорошо представить закономерности распределения частиц в пограничном слое. Поэтому в рамках проекта «Марс-94/96» была создана экспериментальная установка по изучению распределения концентрации твердых частиц в марсианских условиях. Полученные результаты изложены в данной статье.

1. Экспериментальная установка состояла из вертикальной двухфазной аэродинамической трубы незамкнутого типа с открытой рабочей частью, функционирование которой осуществлялось посредством вдува двухфазной среды в рабочую часть и отсоса ее через диффузор (рис. 1). Двухфазный поток создавался конфузуром (1), вдоль оси которого была установлена цилиндрическая труба (2) длиной 3 м и диаметром 100 мм для подачи двухфазной смеси. Поток двухфазной смеси, формирующийся внутри цилиндрической трубы, проходя систему сеток (3), расширялся и, поддерживаемый по краям потоком чистого воздуха,

\* Eesti Teaduste Akadeemia Küberneetika Instituut (Институт кибернетики Академии наук Эстонии). Akadeemia tee 21, EE-0026 Tallinn, Estonia.

\*\* Eesti Teaduste Akadeemia Termofüüsika ja Elektrofüüsika Instituut (Институт термодинамики и электрофизики Академии наук Эстонии). Paldiski mnt. 1, EE-0001 Tallinn, Estonia.



поступал в рабочую часть. Для выравнивания параметров набегающего потока использовались три сетки размерами ячеек 0,63, 0,315, 0,315 мм, расстояние между которыми составляло 12 мм. Варьирование расхода воздуха через каналы однофазного и двухфазного потоков, а также через диффузор (4) позволяло получить однородный двухфазный поток с заданными параметрами. Параметры двухфазного потока измерялись оптико-электронной системой (5), установленной на специальном координатнике с управлением от ЭВМ. Координатник позволяет сканировать поток в трех направлениях с точностью 0,1 мм. Оптико-электронная система на базе лазера, работающего на длине волны  $\lambda=0,6328$  мкм, состояла из двух каналов лазерно-доплеровского анемометра (ЛДА) и лазерного измерителя концентрации (ЛИК). Один канал ЛДА настраивался на измерение скоростей микронных частиц, моделирующих движение несущей газовой среды. Другой канал ЛДА предназначался для измерения скорости дисперсной фазы. В оптической схеме канала ЛИК использовался один из пучков ЛДА, сфокусированный в исследуемую область потока. Метод измерения концентрации основан на измерении интенсивностей рассеянного под некоторым углом света и ослабленного опорного луча в оптически неоднородной среде.

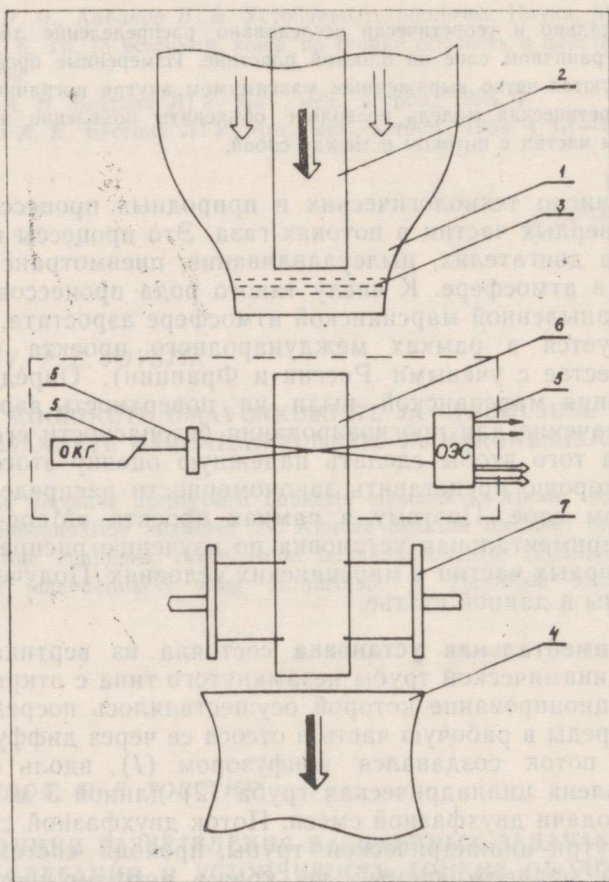


Рис. 1. Экспериментальный стенд. 1 — конфузор, 2 — цилиндрическая труба, 3 — система сеток, 4 — диффузор, 5 — оптико-электронная система, 6 — стальная пластина, 7 — держатель пластины. ОКГ — лазер.

Пограничный слой формировался на гладкой стальной пластине (6), размерами  $400 \times 100 \times 3$  мм, установленной вертикально. Передняя кромка пластины имела клиновидную форму. Измерения выполнялись в сечениях 10, 50, 100 и 170 мм вдоль центральной линии пластины.

Основные определяющие параметры эксперимента ( $U_\infty$ ,  $\delta$ ,  $\alpha_\infty$ ) выбирались из условий образования устойчивого двухфазного ламинарного пограничного слоя на пластине и равномерности подачи дисперсной фазы в рабочую часть трубы. Оптимальная скорость потока в этих условиях составляла 1,5 м/с. Значения чисел  $Re_x$  в исследуемых сечениях не превышали  $10^4$ . Размер частиц твердой примеси определялся условием стоксовского режима обтекания частиц, т. е.  $Re_p = 1$ . Отсюда

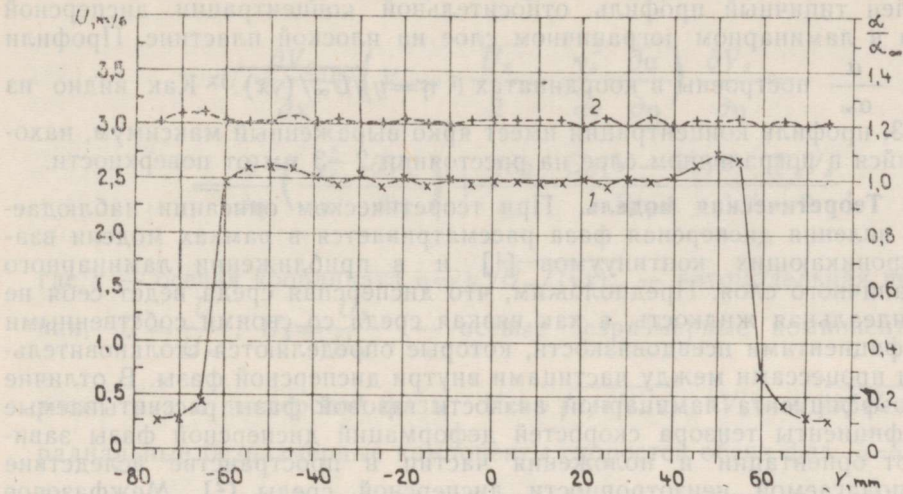


Рис. 2. Распределение концентрации примеси (1) и продольной скорости (2) в поперечном сечении рабочей части трубы.

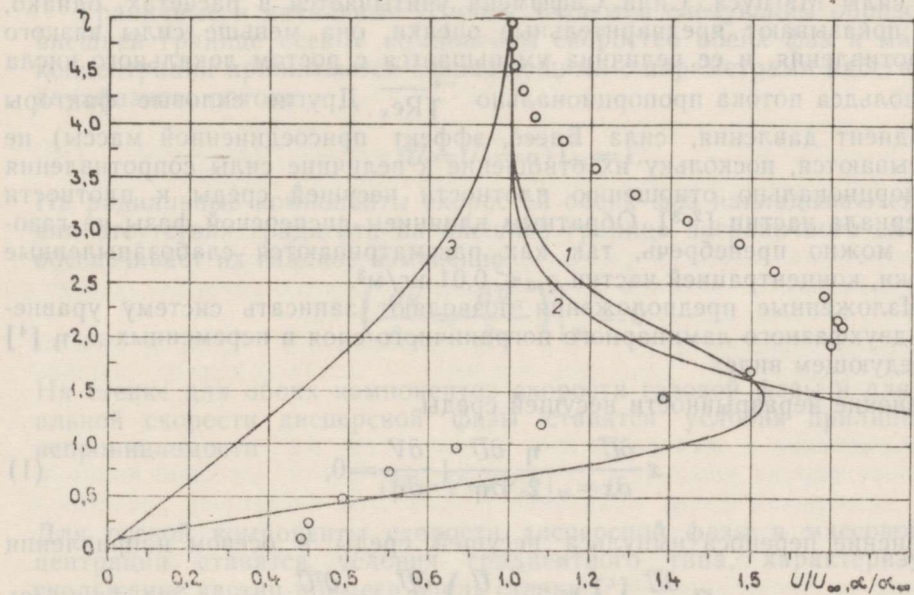


Рис. 3. Сравнение расчетного поля концентрации (1) с теоретическим (2) и экспериментальным полем (кружочки); 3 — распределение скорости.



следует, что размер частиц должен иметь порядок 10 мкм. Частицы, размером менее 10 мкм, при подаче образуют конгломераты, которые при скоростях до 3 м/с не распадаются на мелкие части. Поэтому в работе использовался электрокорундовый порошок ( $\rho_p = 3950 \text{ кг/м}^3$ ), средний размер частиц которого  $\delta = 12 \text{ мкм}$ . Степень полидисперсности порошка не превышала 30%. Концентрация твердой примеси соответствовала условию отсутствия обратного влияния примеси на газовую фазу ( $\rho_{sd} \ll 1$ ) и ее значение составляло  $\rho_{sd\infty} = 0,01 \text{ кг/м}^3$ .

**2. Результаты эксперимента.** На рис. 2 приводится распределение продольной скорости и концентрации примеси в поперечном сечении рабочей части трубы на расстоянии 200 мм от конфузора. Последнее оставалось неизменным по всей длине рабочей части. На рис. 3 представлен типичный профиль относительной концентрации дисперсной фазы в ламинарном пограничном слое на плоской пластине. Профили  $\frac{U}{U_\infty}$ ,  $\frac{\alpha}{\alpha_\infty}$  построены в координатах  $\eta = y\sqrt{U_\infty/(vx)}$ . Как видно из рис. 3, профиль концентрации имеет ярко выраженный максимум, находящийся в пограничном слое на расстоянии 2—3 мм от поверхности.

**3. Теоретическая модель.** При теоретическом описании наблюдаемого явления дисперсная фаза рассматривается в рамках модели взаимопроникающих континуумов [1] и в приближении ламинарного пограничного слоя. Предположим, что дисперсная среда ведет себя не как идеальная жидкость, а как вязкая среда со своими собственными коэффициентами псевдовязкости, которые определяются столкновительными процессами между частицами внутри дисперсной фазы. В отличие от коэффициента ламинарной вязкости газовой фазы рассчитываемые коэффициенты тензора скоростей деформаций дисперсной фазы зависят от ориентации и положения частиц в пространстве вследствие предполагаемой неізотропности дисперсной среды [2]. Межфазовое взаимодействие проявляется в основном в существовании силы вязкого сопротивления движению частиц примеси. Собственное вращение частиц не рассматривается, и поэтому в модели не учитывается влияние силы Магнуса. Сила Саффмена учитывается в расчетах, однако, как показывают предварительные оценки, она меньше силы вязкого сопротивления, и ее величина уменьшается с ростом локального числа Рейнольдса потока пропорционально  $\frac{-4}{\sqrt{Re_x}}$ . Другие силовые факторы (градиент давления, сила Бассе, эффект присоединенной массы) не учитываются, поскольку их отношение к величине силы сопротивления пропорционально отношению плотности несущей среды к плотности материала частиц [2, 3]. Обратным влиянием дисперсной фазы на газовую можно пренебречь, так как рассматриваются слабозапыленные потоки, концентрацией частиц  $\rho_{sd} \leq 0,01 \text{ кг/м}^3$ .

Изложенные предположения позволяют записать систему уравнений двухфазного ламинарного пограничного слоя в переменных  $x, \eta$  [4] в следующем виде:

уравнение неразрывности несущей среды

$$x \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \frac{\eta}{2} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \eta} + \frac{\partial V}{\partial \eta} = 0, \quad (1)$$

уравнение переноса импульса несущей среды в осевом направлении

$$x \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} + \left( V - \eta \frac{\bar{U}}{2} \right) \frac{\partial \bar{U}}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial \eta^2}, \quad (2)$$

уравнение переноса массы дисперсной фазы



$$x \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\alpha} \bar{U}_s) + \frac{\partial}{\partial \eta} \bar{\alpha} \left( V_s - \eta \frac{\bar{U}_s}{2} \right) = \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{D_s}{v} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \eta} \right) - \frac{\bar{\alpha} \bar{U}_s}{2}, \quad (3)$$

уравнения переноса импульса дисперсной фазы в осевом и радиальном направлениях

$$\begin{aligned} x \bar{U}_s \frac{\partial \bar{U}_s}{\partial x} + \left( V_s - \eta \frac{\bar{U}_s}{2} - \frac{v_s^1}{\bar{\alpha} v} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \eta} \right) \frac{\partial \bar{U}_s}{\partial \eta} = \\ = \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{v_s^1}{v} \frac{\partial \bar{U}_s}{\partial \eta} \right) + \frac{18\varrho}{\varrho_p} \frac{C_D (\bar{U} - \bar{U}_s) x}{\text{Re}_p \delta}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} x \bar{U}_s \frac{\partial V_s}{\partial x} + \left( V_s - \eta \frac{\bar{U}_s}{2} - \frac{v_s^2}{\bar{\alpha} v} \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \eta} \right) \frac{\partial V_s}{\partial \eta} = \\ = \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{v_s^2}{v} \frac{\partial V_s}{\partial \eta} \right) + \frac{18\varrho}{\varrho_p} \frac{C_D (V - V_s) x}{\text{Re}_p \delta} + \frac{\bar{U}_s V_s}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x$  — осевая координата,  $\eta = y \sqrt{U_\infty / (vx)}$  — автомодельная переменная;  $\bar{U} = \frac{U}{U_\infty}$ ,  $\bar{U}_s = \frac{U_s}{U_\infty}$  — осевые безразмерные компоненты скорости

газа и дисперсной фазы;  $V = v \sqrt{x / (U_\infty v)}$ ,  $V_s = v_s \sqrt{x / (U_\infty v)}$  — радиальные безразмерные компоненты скоростей обеих фаз;  $\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_\infty}$  —

безразмерная массовая концентрация;  $U_\infty, \alpha_\infty$  — скорость и концентрация частиц набегающего двухфазного потока,  $\text{Re}_p$  — число Рейнольдса частицы;  $C_D$  — коэффициент сопротивления частицы [3];  $\delta$  — размер частицы.

Граничные и начальные условия задаются следующим образом. На внешней границе осевые компоненты скоростей обеих фаз и массовой концентрации принимаются совпадающими с параметрами набегающего двухфазного потока

$$(\bar{U} = \bar{U}_s = \bar{\alpha})|_\infty = 1. \quad (6)$$

На радиальные компоненты скоростей обеих фаз накладываются условия отсутствия градиента на внешней границе пограничного слоя, что обеспечивает их гладкое изменение

$$\left( \frac{\partial V}{\partial \eta} = \frac{\partial V_s}{\partial \eta} \right) \Big|_\infty = 0. \quad (7)$$

На стенке для обоих компонентов скорости газовой фазы и для радиальной скорости дисперсной фазы ставятся условия прилипания и непроницаемости

$$(\bar{U} = V = V_s)|_w = 0. \quad (8)$$

Для осевой компоненты скорости дисперсной фазы и массовой концентрации ставятся условия градиентного типа, характеризующие скольжение частиц примеси вдоль стенки [5]

$$\bar{U}_s \Big|_w = \gamma_1 \frac{\partial \bar{U}_s}{\partial \eta} \Big|_w, \quad (9)$$

$$\bar{\alpha}|_w = \gamma_2 \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \eta} \Big|_w. \quad (10)$$

Коэффициенты  $\gamma_1, \gamma_2$  определяются по формулам

$$\gamma_1 = \frac{l(2 - f_1)}{f_1}, \quad (11)$$

$$\gamma_2 = \frac{l(2 - f_2)}{f_2}. \quad (12)$$

$$f_1 = \frac{1 - (5 + 2K_t)}{7} \quad (13)$$

$$f_2 = \frac{1 - K_n}{1 + K_n}, \quad (14)$$

где  $l$  — длина свободного пробега частиц, константы  $f_1, f_2$  характеризуют потери импульса дисперсной фазы в осевом и в радиальном направлениях при взаимодействии со стенкой. Начальное распределение скорости газовой фазы находится из решения системы уравнений (1), (2) при  $x=0$  и имеют автомодельную форму. Распределение параметров дисперсной фазы задается равномерным по начальному сечению

$$\bar{U}(0, \eta) = \bar{U}_s(0, \eta) = \bar{\alpha}(0, \eta) = 1. \quad (15)$$

Коэффициенты псевдодисперсной вязкости и коэффициент псевдодиффузии определяются в соответствии с подходом, изложенным в [2]

$$\frac{v_s^1}{v} = \left( \frac{(a_1 + a_2)^2}{8} \bar{V}_p \Phi^2 + \frac{a_3^2}{8 \bar{V}_p} + \frac{4a_3}{15} (2a_1 + 3a_2) \right) \text{Re}_p \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \frac{Q_p}{\rho \alpha}}, \quad (16)$$

$$\frac{v_s^2}{v} = \left( \left( \frac{2}{3} (a_1 + a_2) \right)^2 \bar{V}_p \Phi + \frac{a_3^2}{\Phi \bar{V}_p} + \frac{4a_3 \Phi (a_1 + 4a_2)}{15} \right) \text{Re}_p \sqrt[3]{\frac{\pi}{6} \frac{Q_p}{\rho \alpha}}, \quad (17)$$

$$D_s = v_s^2, \quad (18)$$

$$a_1 = \frac{1 - K_{pn}}{2}; \quad a_2 = \frac{1 - K_{pt}}{7}; \quad a_3 = a_2 \frac{\delta}{x} \sqrt{\text{Re}_x} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \eta}. \quad (19)$$

Коэффициенты  $K_t, K_p$  и  $K_{pt}, K_{pn}$  представляют собой коэффициенты восстановления осевой и радиальной компонент скорости частиц при взаимодействии со стенкой и столкновении друг с другом соответственно,  $\varphi$  — угол расхождения траектории частиц.

Система уравнений (1) — (5) с граничными (6) — (10) и начальными условиями (15) решалась численно с использованием неявной монотонной схемы [6].

**4. Сравнение с экспериментом.** В результате расчетов были найдены распределения компонент скоростей обеих фаз и массовой концентрации дисперсной фазы. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными представлено на рис. 3. Расчетная кривая 1 соответствует потоку с частицами  $\delta = 12$  мкм. Кривая 2 на рис. 3 получена по теоретической модели [7, 8]. Как видно из сопоставления теоретических результатов с экспериментальными данными, разработанная модель отражает тенденцию формирования максимума концентрации в пограничном слое, установленную экспериментально. По суще-



ствующим же теоретическим представлениям максимум концентрации должен находиться на поверхности. В то же время по диффузионной теории максимум находится на внешней границе пограничного слоя и совпадает со значением концентрации набегающего потока. Полученные в данной работе теоретические и экспериментальные профили концентрации занимают промежуточное положение между этими двумя предельными случаями. Имеющееся расхождение экспериментальных и расчетных результатов объясняется приближенным описанием коэффициентов  $\nu^1_s$  и  $\nu^2_s$ .

**5. Заключение.** С помощью оптического метода получены распределения концентрации примеси в ламинарном пограничном слое на плоской пластине в диапазоне изменения чисел Рейнольдса  $Re=10^3-10^4$ .

Измеренные значения концентрации существенно и систематически отличались как от чисто диффузионного профиля продольной скорости, так и от предсказаний существующих теоретических подходов. Во внешней части пограничного слоя наблюдается тенденция роста концентрации, однако вблизи стенки определяющую роль начинают играть диффузионные процессы.

Для объяснения поведения частиц вблизи поверхности пластины построена теоретическая модель двухфазного ламинарного пограничного слоя, использующая концепцию псевдовязкости дисперсной среды.

Численные расчеты двухфазного ламинарного пограничного слоя, основанные на предлагаемой модели, позволяют более уверенно прогнозировать поведение частиц в потоке газа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Часть I. Наука, Москва, 1987.
2. Картушинский А., Мульги А. — Изв. АН Эстонии. Физ. Матем., 1991, 40, 2, 130—135.
3. Шрайбер А. А., Гавин Л. Б., Наумов В. А., Яценко В. П. Турбулентные течения газовзвеси. Наукова думка, Киев, 1987.
4. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. I. Мир, Москва, 1990.
5. Чепмен С., Каулинг Т. Математическая теория неоднородных газов. ИЛ, Москва, 1960.
6. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Мир, Москва, 1980.
7. Осипцов А. Н. Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, 4, 48—54.
8. Асмолов Е. С. Изв. АН СССР. МЖГ, 1992, 1, 66—73.

Поступила в редакцию  
7/IX 1992

\* Tallinn Tehnikakool (Tallinn Technical University), Ehitajate tee 5, EE-0026 Tallinn, Estonia.

\*\* This paper was originally presented at the IFAC/IFIP Workshop on Real-time Programming, 23—26 June, 1992, Bruges, Belgium.

Arkadi BEREZOVSKI, Aleksander KARTUSINSKI, Anatoli MULGI,  
Ülo RUDI, Sergei TISLER, Medhat HUSSAINOV

## TAHKETE OSAKESTE JAOTUSE EKSPERIMENTAALNE JA NUMBRILINE MODELLEERIMINE LAMINAARSES PIIRIKIHIS

Ekspimentaalse ja numbrilise modelleerimise meetoditega on uuritud tahkete osakeste jaotumist laminaarsetes piirikihis plaadi pinnal. Erinevalt senituntud jaotusest on töös mõõdetud tahkefaasi kontsentratsiooniväljade maksimum piirikihi sees. Väljatöötatud teoreetiline mudel võimaldab põhjendada kontsentratsiooni maksimumi paiknemist piirikihi sees osakeste omavahelise ning osakeste ja vooluse vahelise koostoimega.

Arkady BEREZOVSKY, Alexander KARTUSHINSKY, Anatoly MULGI,  
Ülo RUDI, Sergei TISLER, and Medhat HUSSAINOV

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION OF THE DISTRIBUTION OF THE SOLID PARTICLES IN THE LAMINAR BOUNDARY LAYER

The distribution of solid particles in the laminar boundary layer on the flat plate was studied by laboratory and theoretical testing. The measured profiles of the mass concentration of the solid phase have explicit maximum values inside the boundary layer. The developed theoretical model enables to explain the existence of this concentration maximum as a result of interaction between the particles, and also between the particles and flow.