

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА В ТУРБУЛЕНТНОМ ГАЗОКАПЕЛЬНОМ ПОТОКЕ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

М.А. Пахомов, В.И. Терехов

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,

*В работе выполнено численное исследование теплообмена динамики и тепломассообмена в турбулентном пограничном слое на плоской вертикальной пластине. Проанализирован большой спектр факторов, влияющих на тепломассообмен и структуру тепловых и концентрационных полей в турбулентном пограничном слое. Показано, что увеличение содержания капель приводит к интенсификации теплоотдачи по сравнению с однофазным воздушным течением. Проведенное сопоставление результатов анализа с опытными данными свидетельствует о качественном и количественном согласии расчетных и экспериментальных данных.*

## NUMERICAL MODELING OF FLOW AND HEAT TRANSFER IN A TURBULENT MIST BOUNDARY LAYER

M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov

Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

*In the paper performed numerical modeling of flow and heat transfer in a turbulent boundary layer over a flat vertical plate. It was analyzed an effect of thermal and gas dynamics parameters on the heat transfer rate and flow patterns and in the turbulent boundary layer. The increase of droplets mass fraction leads to significant enhancement of heat transfer in two-phase systems in comparison of one-phase air flow in the boundary layer. The predictions tested against experimental results for gas-dispersed turbulent boundary layer. Good agreement was obtained over the whole range of initial conditions.*

### **Введение**

Большое количество природных и технологических процессов связано с двухфазными турбулентными потоками типа «газ-капли». Это – рассеяние примеси в атмосфере, процессы распыливания и горения жидких топлив и пр. Изучение процессов тепло- и массопереноса в таких потоках представляет большой научный и практический интерес.

В данной работе выполнено численное исследование процессов динамики течения и турбулентного теплообмена газокапельного потока с изотермической поверхностью

### **Постановка задачи**

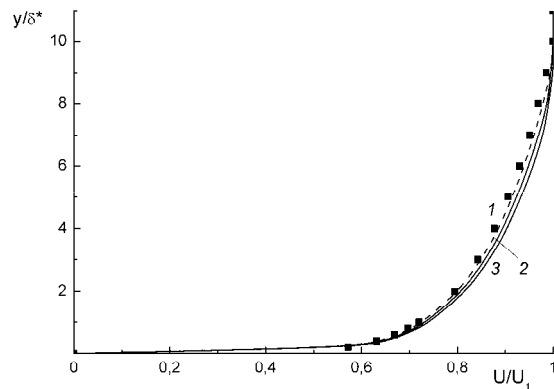
В работе рассмотрено двумерное стационарное обтекание плоской изотермической пластины турбулентным потоком смеси воздуха и монодисперсных капель жидкости с учетом их испарения и диффузии пара в воздух. В работе для моделирования туманообразного потока применяется эйлеров подход, развитый в работе Терехов и Пахомов [1]. В работе использовалась  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности в модификации Hwang and Lin [2] с учетом двухфазности потока.

Все расчеты были проведены для туманообразного газокапельного течения. Его скорость во внешнем невозмущенном потоке была постоянной и равной  $U_1 = 10$  м/с; температура смеси также не изменялась  $T_1 = 293$  К, при этом массовая концентрация пара во внешнем течении  $M_{V1} = 0.005$ . В расчетах варьировались четыре параметра – число Рейнольдса  $Re_x = U_1 x / \nu = 3 \times 10^5 - 10^6$ ; температура стенки  $T_w = 323 - 473$  К; массовая концентрация жидкой фазы  $M_{L1} = 0 - 0.05$  и диаметр капель во внешнем потоке  $d_1 = 0 - 100$  мкм. Все расчеты были проведены для монодисперсных капель воды. Считается, что во внешнем течении испарения капель нет.

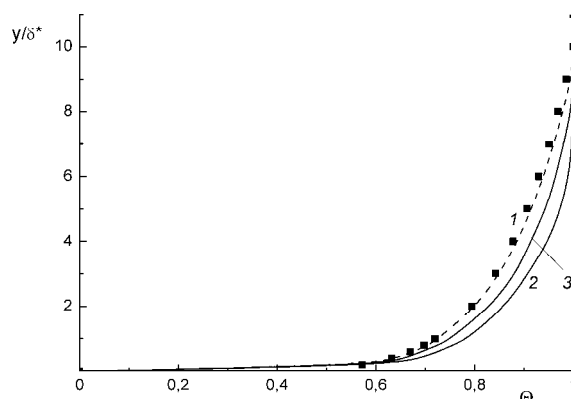
На первом этапе было выполнено сопоставление результаты численных расчетов по модели с результатами измерений Rogers and Eaton (1991) турбулентного обтекания вертикальной пластины потоком воздуха с твердыми частицами. Проведенное сопоставление результатов численного анализа с экспериментальными данными свидетельствует об их количественном согласии.

### Результаты численного анализа

Основное внимание в данном разделе было уделено влиянию размера жидкой фазы на распределение скоростей, температур газа и распределению концентрации компонентов двухфазной смеси в пограничном слое. Расчетные относительные профили скоростей и температур по сечению пограничного слоя показаны на рис. 1, где пунктир – расчет для однофазного воздушного потока,  $\Theta = (T_W - T) / (T_W - T_1)$  – профиль температуры в газокapельном потоке и  $\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{U}{U_1}\right) dy$  – толщина вытеснения. При отсутствии жидкой фазы ( $M_{L1}=0$ ) результаты расчетов распределения скорости газа (рис. 1а) совпадают с профилем  $U/U_1 = (y/\delta)^{1/7}$  [3]. Увеличение начального размера капель жидкости приводит к несколько большему наполнению профиля скорости, что вызвано ростом градиента скорости газа в окрестности стенки. Однако необходимо заметить, что наличие жидкой фазы в потоке оказывает значительно большее влияние на распределение температур (рис. 1б), что в итоге должно вызвать более интенсивный рост теплообмена по сравнению с трением. Толщина пограничного слоя, как это следует из данных рис. 1а, практически не изменяется в зависимости от размера капель. Отметим, что большее влияние на величину температуры газовой фазы оказывают частицы начальным размером в 50 мкм, тогда как воздействие на скорость, а, значит, и на трение на стенке пластины возрастает с ростом диаметра.



а



б

Рис. 1. Профили скорости газа (а) и его температуры (б) по толщине двухфазного пограничного слоя.  $Re_x = 5 \times 10^5$ ,  $\delta^* = 2$  мм,  $U_1 = 10$  м/с,  $T_W = 373$  К,  $M_{L1} = 5$  %. Точки – расчет по степенной зависимости [3]. 1 –  $d_1 = 0$  мкм; 2 – 50; 3 – 100.

Отмеченные выше особенности в распределении профилей скоростей и температур в двухфазном потоке, обтекающем плоскую вертикальную пластину, находят свое отражение в распределении размеров капель в пределах пограничного слоя. Эти данные приведены на

рис. 2. С увеличением начального размера капли испаряются менее интенсивно в пристенной области. По мере продвижения вниз по потоку за счет прогрева и испарения частиц зона однофазного парогазового течения в окрестности стенки увеличивается.

Изменение турбулентности газа по поперечной координате приведено на рис. 3, где  $k_A$  – турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ) в однофазном потоке. Причем этот эффект возрастает с ростом размера дисперсной фазы. Таким образом небольшие частицы хорошо вовлекаются в турбулентное движение газа и отнимают часть энергии турбулентности. В пристенной зоне даже на небольшом расстоянии от начала расчетной области ( $Re_x = 5 \times 10^5$ ) величина  $k/k_A \approx 1$  за счет того, что капли испарились и уровень турбулентности стремится к своему значению для однофазного режима течения. Во внешнем течении, где испарения нет  $k/k_A \rightarrow const$ . При продвижении вниз по потоку величина модификации ТКЭ уменьшается по мере испарения частиц и турбулентность газа возрастает и  $k/k_A \rightarrow 1$ , причем этот эффект проявляется на более дальнем расстоянии от поверхности пластины.

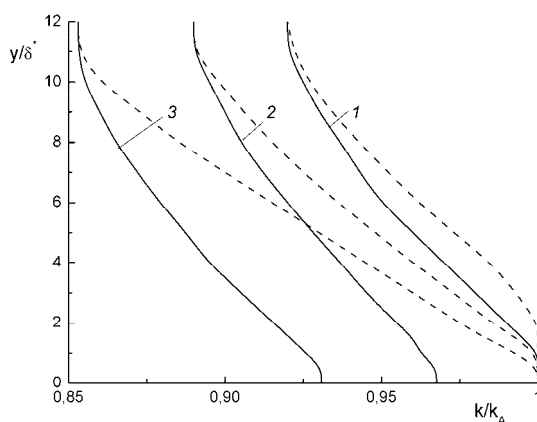


Рис. 3. Влияние капель на изменение турбулентности газовой фазы. Обозначение линий и условия проведения расчетов соответствуют данным рис. 2.

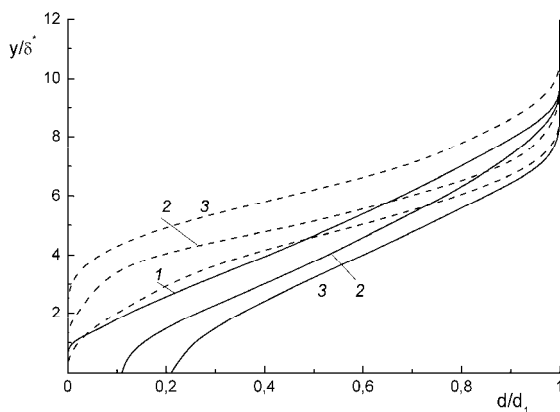


Рис. 2. Изменение размера частиц по толщине турбулентного пограничного слоя. Непрерывные линии –  $Re_x = 5 \times 10^5$ ,  $\delta^* = 2$  мм, пунктир –  $Re_x = 10^6$ ,  $\delta^* = 3$  мм.  $U_1 = 10$  м/с,  $T_w = 373$  К,  $M_{L1} = 5$  %. 1 –  $d_1 = 10$  мкм; 2 – 50; 3 – 100.

Наличие в потоке жидких капель приводит к значительному увеличению параметра интенсификации теплообмена. Эти данные представлены на рис. 4. Степень увеличения теплообмена может достигать больших величин (примерно в четыре раза по сравнению с однофазным потоком). Естественно, что с ростом концентрации капель теплообмен интенсифицируется и этот эффект более заметен на небольших расстояниях от начала расчетной области. Увеличение числа Рейнольдса  $Re_x$  при всех прочих одинаковых условиях

приводит к значительному возрастанию теплообмена. Подобная тенденция прослеживается и для других режимных условий числа Рейнольдса  $Re_x$  в двухфазном потоке при всех прочих одинаковых условиях приводит к значительному возрастанию теплообмена. Подобная тенденция прослеживается и для других режимных условий. С ростом массовой концентрации жидкой фазы кривые корреляционного соотношения  $Nu_x = f(Re_x)$  нарастают более резко, и далее вниз по потоку по мере расширения зоны однофазного течения в пристенной области их наклон становится близким к закону турбулентного пограничного слоя в стандартных условиях

$$Nu_x = 0.0288 Re_x^{0.8} Pr^{0.4} . \quad (1)$$

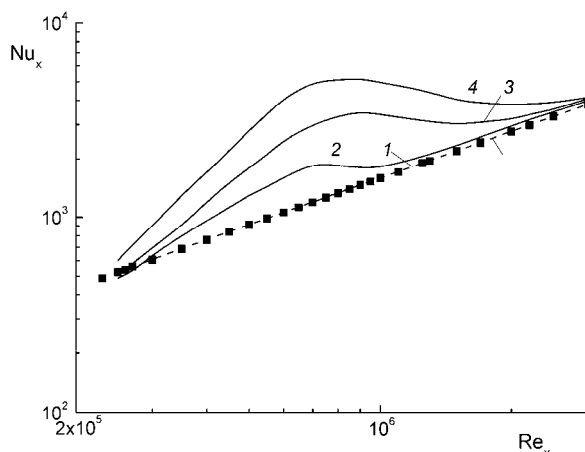


Рис. 4. Распределение числа Нуссельта в зависимости от числа Рейнольдса.

Точки – расчет по формуле (1). Расчет настоящей работы для однофазного режима течения.  $U_1 = 10$  м/с,  $d_1 = 50$  мкм,  $T_w = 373$  К. 1 –  $M_{L1} = 0$ ; 2 – 0.01; 3 – 0.02; 4 – 0.05.

Трение на стенке увеличивается с ростом размера дисперсной фазы и ее концентрации, а у теплообмена есть некий оптимум, до которого теплообмен с возрастанием размера капель увеличивается, а далее – снижается за счет значительного уменьшения площади межфазной поверхности. Данный вывод также отмечается в наших работах по моделированию теплообмена в турбулентных газочапельных течениях в трубе [1, 5].

### Сопоставление с данными измерений

Авторами не было найдено в литературе, в отличие от ламинарного пограничного слоя, данных по измерению структуры течения и теплообмена при турбулентном обтекании вертикальной пластины туманообразным газочапельным потоком. Поэтому в данном разделе приведены сопоставления с известными измерениями по структуре турбулентного пограничного слоя воздуха с твердыми частицами [3].

Эксперименты работы [4] были выполнены с использованием LDA метода, модифицированного для измерений в двухфазных потоках. В [4] проводились измерения в восходящем потоке по влиянию добавления монодисперсных частиц стекла размером  $d = 50$  и  $90$  мкм при их массовой концентрации  $M_{L1} = 0.02$  на изменение структуры течения и турбулентности газовой фазы. Эксперименты проводились на расстояниях  $x = 55$  см ( $\delta = 20$  мм,  $\delta^* = 3$  мм,  $\delta^{**} = 2.1$  мм,  $Re_x = 2.9 \times 10^5$ ) и  $85$  см ( $\delta = 24$  мм,  $\delta^* = 3.8$  мм,  $\delta^{**} = 2.6$  мм,  $Re_x = 4.5 \times 10^5$ ) от начала пластины, обдуваемой нисходящей двухфазной смесью твердых частиц и воздуха. Скорость газа во внешнем потоке  $U_1 = 8 - 8.2$  м/с. Отметим, что скорости газа для однофазной и двухфазной смесей были в измерениях примерно одинаковы.

Изменение продольной и поперечной компонент турбулентности газовой фазы (однофазный режим течения) и дисперсной фазы по поперечной координате приведено на рис. 5. Аксиальная компонента пульсаций скорости частиц и газа существенно возрастает по

мере приближения к поверхности пластины. В продольном направлении (рис. 5а) интенсивность пульсаций скорости частиц  $\langle u_p^{1/2} \rangle / U_1$  (линии 2 и 3) выше соответствующего значения для газа  $\langle u^{1/2} \rangle / U_1 = 2k / (3U_1)$  (1) по всему сечению пограничного слоя, что согласуется с численными данными работ [1] по исследованию турбулентного газодисперсного течения в трубе.

Распределения поперечных пульсаций скорости однофазного газа  $\langle v^{1/2} \rangle / U_1 = 2k / (3U_1)$  и частиц  $\langle v_p^{1/2} \rangle / U_1$  представлено на рис. 5б. Интенсивность трансверсальных пульсаций частиц меньше соответствующего значения при однофазном течении газа. Этот факт можно интерпретировать следующим образом. Число Стокса в крупномасштабном движении [6] для рассматриваемых условий  $Stk = O(1)$  и частицы вовлекаются в крупномасштабное движение газа и отбирают часть энергии от газа. Снижение величины поперечных пульсаций газовой фазы вызывает уменьшение скорости пульсаций частиц. В пристенной области величина турбулентности газа резко возрастает. Размер дисперсной фазы оказывает сильное влияние на интенсивность флуктуаций скорости частиц по всему сечению пограничного слоя. Причем этот эффект увеличивается с ростом размера дисперсной примеси.

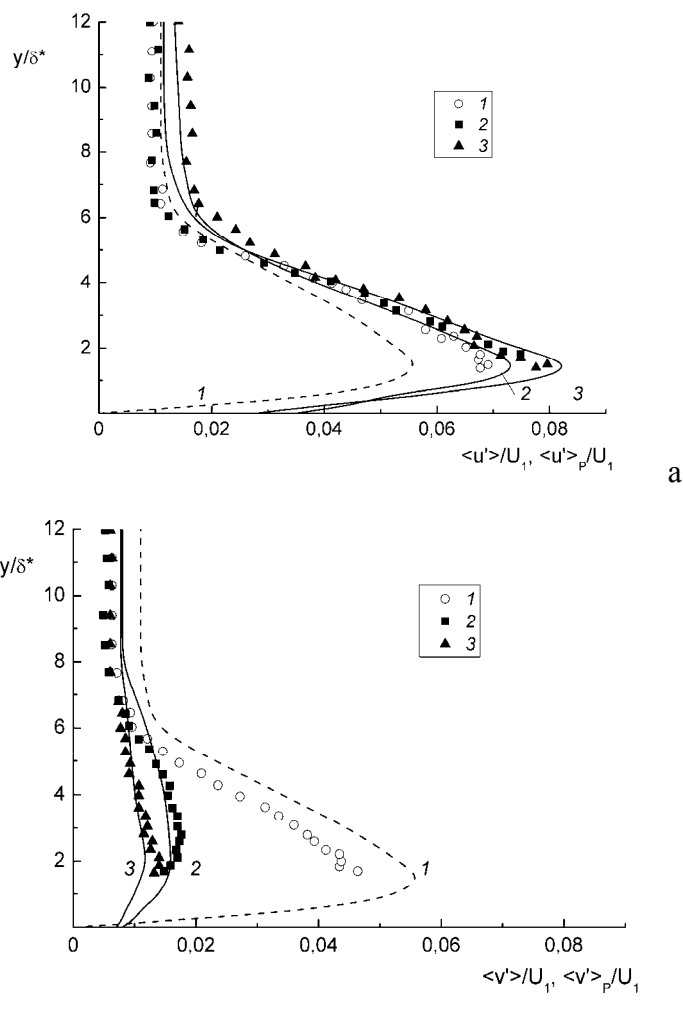


Рис. 5. Распределения продольных (а) и поперечных (б) пульсаций скорости газа (непрерывные линии) и частиц стекла (пунктир) по толщине пограничного слоя при  $M_{L1} = 0.02$ ,  $x = 0.55$  м. 1 – газовая фаза; 2 – частицы стекла ( $d = 50$  мкм); 3 – частицы стекла ( $d = 90$  мкм).

## **Заключение**

Толщина пограничного слоя практически не изменяется в зависимости от размера капель и их концентрации. Наличие жидкой фазы в потоке оказывает значительно большее влияние на распределение температур, что в итоге вызывает более интенсивный рост теплообмена по сравнению с трением. Трение на стенке при увеличении концентрации капель возрастает незначительно.

На интенсивность теплообмена в турбулентном туманообразном потоке оказывает сильное влияние температура внешнего потока и его скорость, размер дисперсной фазы и температура поверхности стенки. Показано, что увеличение содержания жидкой фазы приводит к значительной интенсификации теплоотдачи по сравнению с однофазным течением воздуха. Изменение скорости потока или продольной координаты при фиксированном числе Рейнольдса  $Re_x$  приводят к различным закономерностям теплообмена, что свидетельствует о сложном и неоднозначном влиянии числа Рейнольдса на теплообмен в газочапельном потоке. Испаряющиеся капли оказывают различное воздействие на трения и теплообмен в двухфазном потоке. Трение незначительно увеличивается с ростом размера и концентрации дисперсной фазы, а у теплообмена есть некий оптимум, до которого теплообмен с возрастанием размера капель увеличивается, а далее – снижается за счет значительного уменьшения межфазной поверхности.

Проведенное сопоставление результатов анализа с экспериментальными и численными данными свидетельствует о количественном согласии расчетных и опытных данных.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проектов РФФИ 09-08-00929 и 09-08-00197) и Фонда Президента РФ для молодых кандидатов наук (грант МК-504.2010.8).

## **Литература**

1. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газочапельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2008. 284 с.
2. Hwang C.B., Lin C.A. Improved low-Reynolds-number  $k-\epsilon$  model based on direct simulation data // AIAA J. 1998. V. 36. P. 38–43.
3. Шлихтинг Г. теория пограничного слоя. М.: Наука. 1969. 742 с.
4. Rogers C.B., Eaton J.K. The behavior of small particles in a vertical turbulent boundary layer in air // Int. J. Multiphase Flow. 1990. V. 16. P.819-834.
5. Терехов В.И., Пахомов М.А. Численное исследование гидродинамики, тепло- и массообмена двухфазного газочапельного потока в трубе // ПМТФ. 2003. Т. 44. № 1. С. 108-122.
6. Вараксин А.Ю. Турбулентные течения газа с твердыми частицами. М.: Физматлит. 2003. 192 с.