

Э.П. Волчков, В.В. Лукашов, С.В. Жиливостова

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

## ВЛИЯНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ТЕРМОЭФФЕКТА НА СТРУКТУРУ ЛАМИНАРНОГО ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С ИНОРОДНЫМ ВДУВОМ

### АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследованы особенности структуры теплового пограничного слоя при вдуве гелия и водорода в поток воздуха. В условиях изотермического вдува ( $T_0=T_1 \approx 25^\circ\text{C}$ ) наблюдается разогрев пристенной части потока до  $\sim 9^\circ\text{C}$ . С другой стороны, во внешней части пограничного слоя происходит охлаждение потока, причем зона охлаждения располагается в верхней области динамического пограничного слоя и выходит в основной поток. Такая структура теплового пограничного слоя обусловлена перераспределением теплоты пристенного потока за счет диффузионного термоэффекта (эффекта Дюфо).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования влияния термодиффузионного эффекта (эффекта Сорре) и диффузионного термоэффекта (эффекта Дюфо) на тепло- и массообмен в пограничном слое стали проводиться начиная с 60-х годов [1,2]. Это было связано с развитием методов тепловой защиты поверхностей, основанных на использовании инородного вдува через проницаемую поверхность. Влияние эффекта Дюфо на структуру пограничного слоя исследовалось численно в [3], где была рассмотрена естественная конвекция на вертикальной стенке при вдуве гелия в воздух. В частности, было показано, что диффузионный термоэффект приводит к перераспределению температуры в пограничном слое: вблизи пористой поверхности происходит увеличение температуры, а на некотором удалении от стенки существует область охлаждения. При этом оказалось, что эффектом Сорре можно пренебречь. Во всех указанных исследованиях пограничный слой с вдувом инородного газа в поток воздуха рассматривался как бинарная смесь газов.

В данной работе представлены экспериментальные данные о влиянии диффузионного термоэффекта (эффекта Дюфо) на структуру теплового пограничного слоя. Полученные данные важны для анализа процессов теплообмена в пограничном слое с инородным вдувом.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу непрерывного действия незамкнутого типа. Схема установки показана на рис. 1.

Воздух, подающийся из магистрали, проходит через электрический нагреватель I мощностью 5 кВт, диффузор II, форкамеру III, профилированное сопло IV, рабочую часть V и выбрасывается в атмосферу. Максимальная скорость воздуха в рабочем канале составляет 10 м/с. Используемая в качестве нагревательного элемента нихромовая проволока располагалась перпендикулярно направлению течения воздуха, образуя решётку. Такое расположение обеспечивало выравнивание потока и его равномерный нагрев до необходимой в эксперименте температуры. Рабочая часть имеет прямоугольное сечение площадью  $0.108 \times 0.108 \text{ м}^2$ , длина канала - 0.5 м. Нижнее газопроницаемое основание канала выполнено из нержавеющей стали. Размеры пластин  $0.148 \times 0.098 \text{ м}$ . Расход измерялся ротаметрами типа РС-5. Скорость воздушного потока контролировалась с помощью расходомерной шайбы.

Температура пористой стенки измерялась хромель-алюмелевыми термопарами, выполненными из проволоки диаметром 0.1 мм. Десять термопар вде-

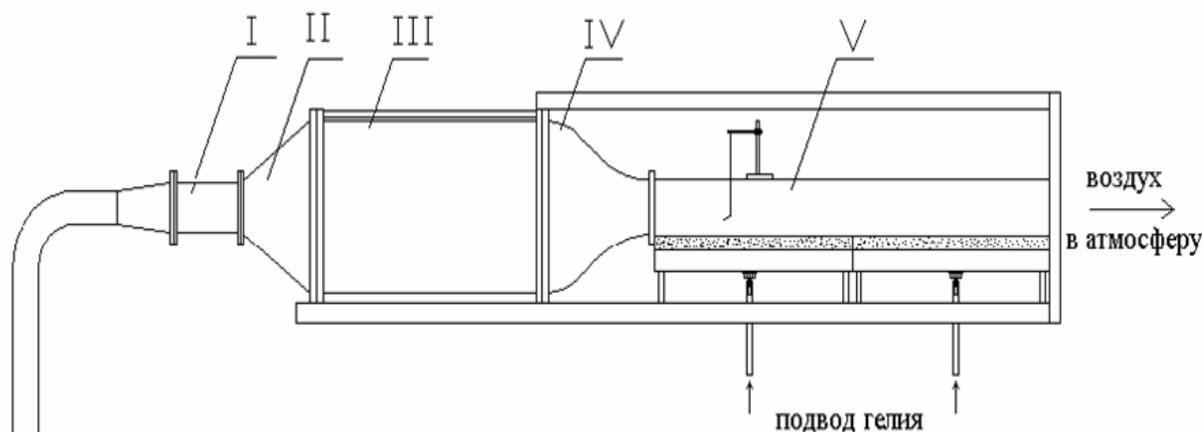


Рис.1. Схема экспериментальной установки

ланы в наружную поверхность пористой пластины заподлицо. Температура в пограничном слое и в ядре потока измерялась медьконстантановой термопарой, выполненной из проводов диаметром 0.1 мм, сваренных “встык”. Термопара была растянута между ножками керамической вилки и установлена по изотерме. Перемещение термопарного зонда в направлении, перпендикулярном стенке, осуществлялось с помощью координатника и индикатора перемещений ИЧ-10 с точностью 0.01 мм, перемещение по продольной оси X производилось также с помощью координатника с шагом 1 мм. Термопары, вделанные в поверхность пористого материала, имеют точность измерений  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ , термопарный зонд пограничного слоя имеет точность измерений  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Для сопряжения термопар с платой LabMaster, служащей для фиксирования и обработки сигналов, идущих с термопар, использовался модуль TermoLab-16Sh-9V. Этот модуль представляет собой 16-ти канальный АЦП с разрешающей способностью 7 мкВ.

### 3. СТРУКТУРА ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

На рис. 2 представлены профили температуры при изотермическом вдуве гелия, т.е. в условиях, когда температура вдуваемого гелия равна температуре воздуха:  $T_1=T_0=298\text{ K}$  и равна комнатной температуре. Поскольку, как показали оценки, газодинамическим нагревом гелия (водорода) и эффектом дросселирования в условиях данных опытов можно пренебречь, увеличение температуры вблизи стенки обусловлено только диффузионным термоэффектом. С другой стороны, во внешней части пограничного слоя наблюдается область охлаждения потока. В [4] было показано, что эффект Соре приводит к перераспределению концентрации гелия в пограничном слое: существуют зоны с повышенной и пониженной концентрацией гелия.

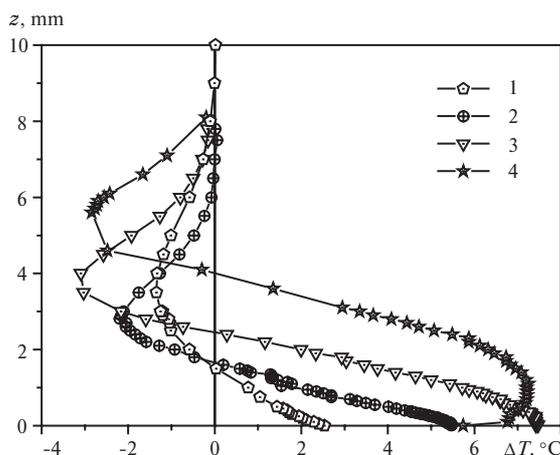


Рис.2. Распределение температуры в ламинарном пограничном слое при вдуве гелия в воздух: 1 – данные для  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X}=0.06$ ; 2 – данные для  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X}=0.15$ ; 3 – данные для  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X}=0.2$ ; 4 – данные для  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X}=0.3$

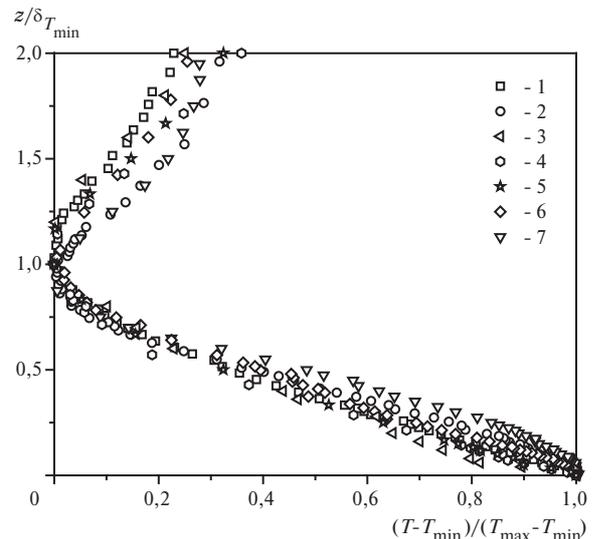


Рис.3. Безразмерные профили температуры: вдув водорода в воздух: 1 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.032$ , 2 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.039$ ; вдув гелия в воздух: 3 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.037$ , 4 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.062$ , 5 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.128$ , 6 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.15$ , 7 -  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} = 0.2$

Величина теплового эффекта на стенке немонотонно изменяется по мере увеличения интенсивности вдува (и концентрации вдуваемого газа на стенке). При  $\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X} < 0.2$  увеличение вдува приводит к разогреву пористой поверхности. Дальнейшее увеличение вдува сопровождается смещением области максимальных температур от стенки в поток. Как известно, при граничных условиях  $\bar{J}_{CT} = \text{const}$  величина  $(\bar{J}_{CT}\sqrt{\text{Re}_X})_{KP}$  критического для вдува гелия в воздух составляет 0.48. Таким образом, снижение температуры стенки наблюдается при докритических вдувах.

На рис. 3 представлены безразмерные профили температуры при малых умеренных вдувах как гелия, так и водорода в изотермических условиях. Данные хорошо обобщаются, однако при больших докритических вдувах наблюдается расслоение в пристенной части потока.

Балансовое соотношение тепловых потоков на стенке имеет вид:

$$JC_{1p}(T_{CT} - T_1) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{CT} + \alpha RT_{CT} \frac{M_\Sigma}{M_1 M_0} (1 - K_{iCT}). \quad (1)$$

По нашим оценкам было установлено, что при  $\Delta T=(T_1-T_0)=50\text{ K}$  для гелия суммарный тепловой поток через стенку составляет 45% от теплового потока за счет теплопроводности, т.е.  $\lambda(\partial T/\partial y)$ . Причем при увеличении  $\Delta T$  влияние диффузионного термоэффекта на суммарный тепловой поток уменьшается.

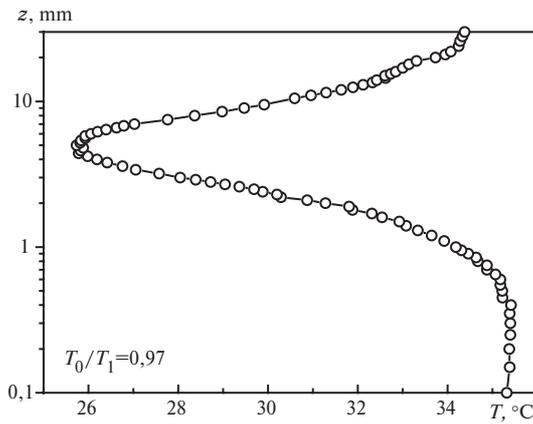


Рис.4. Распределение температуры при вдуве гелия в воздух в условиях  $(dT/dy)_{ст} \rightarrow 0$

Для гелия диапазон  $T_1/T_0$ , в котором можно реализовать условие  $(dT/dy)_{ст}=0$  на стенке, равен  $\{0.94; 1.07\}$ . В этом случае балансовое соотношение тепловых потоков на стенке (1) принимает вид

$$C_{1p}(T_{CT} - T_1) = \alpha R T_{CT} \frac{M_{\Sigma}}{M_1 M_0} (1 - K_{iCT}). \quad (2)$$

На рис. 4 представлен экспериментальный профиль температуры при вдуве гелия с температурой  $T_1=299$  К в нагретый основной поток воздуха до температуры  $T_0=308$  К при  $\bar{J}_{CT} \sqrt{Re_x} = 0.334$ .

Для экспериментального определения термодиффузионной постоянной  $\alpha$  оптимально соответствует условию  $(dT/dy)_{ст}=0$ , реализованное в эксперименте. В этом случае, пользуясь балансовым соотношением (2) тепловых потоков на стенке при условии  $(dT/dy)_{ст}=0$  можно оценить  $\alpha$ , зная значения  $K_{iCT}$ .

## ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное исследование структуры теплового пограничного слоя при вдуве гелия и водорода в поток воздуха. Измерены профили температур. Экспериментально установлены особенности структуры теплового пограничного слоя: при вдуве гелия в поток воздуха при условии, что  $T_0 \approx T_1$ , наблюдается разогрев пристенной части потока, температура поверхности превышает температуру основного потока на величину до  $\sim 9^\circ\text{C}$ . С другой стороны, во внешней части пограничного слоя происходит охлаждение потока, причем зона охлаждения располагается в верхней области динамического пограничного слоя и выходит в основной поток.

Поскольку в потоке нет источников энергии, характер теплового пограничного слоя обусловлен

перераспределением теплоты пристенного потока за счет диффузионного термоэффекта.

Максимальный нагрев при малых вдувах происходит на стенке. Однако при больших докритических вдувах максимальный тепловой эффект смещается от стенки в поток.

Показано, что существует диапазон  $T_1/T_0 = \{0.94; 1.07\}$ , в котором можно реализовать условие  $(dT/dy)_{ст}=0$  на стенке.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № НШ-6965.2006.8 и гранта РФФИ № 05-02-16478.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$C_{1p}$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$J = \rho_1 u_1$  – поток вещества через поверхность;

$\bar{J} \sqrt{Re_x} = \frac{\rho_1 u_1}{\rho_0 U_0} \sqrt{Re_x}$  – параметр вдува;

$K_i$  – массовая доля компонента  $i$ ;

$M$  – молекулярный вес;

$R$  – газовая постоянная, Дж/(моль К);

$Re_x = \frac{U_0 x}{\nu}$  – число Рейнольдса;

$T$  – текущая температура в пограничном слое, К;

$T_0$  – температура воздушного потока, К;

$T_1$  – температура инжектанта, К;

$U_0$  – скорость основного потока, м/с;

$z$  – координата в перпендикулярном направлении к поверхности, м;

$\alpha$  – термодиффузионная постоянная;

$\delta_{T_{min}}$  – координата в перпендикулярном направлении к поверхности, соответствующая температуре  $T_{min}$ , м;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Индексы:

0 – основной поток;

1 – вдуваемый газ;

ст – на стенке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон Дж.Р. Термодинамические обобщенные силы в пограничных слоях // РТК. 1962. №7. С. 63-71.
2. Спэрроу, Минкович, Эккерт. Диффузионные термоэффекты в потоке воздуха в окрестности критической точки при вдуве в пограничный слой газов с различными молекулярными весами // РТК. 1964. №4. С. 80-90.
3. Duranskaya Z., Worek W.M. Diffusion-thermo and thermal-diffusion effects in transient and steady natural convection from a vertical surface // Int. J. Heat Mass Transfer. 1992. V. 35. №8. P. 2060-2065.
4. Greenberg J.B., Tambour Y., Gal-Or B. A solution procedure for heat and mass transfer in multicomponent laminar jets // Int. J. Heat Mass Transfer. 1979. V. 23. P. 1595-1598.