УДК 532.526

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПУТЕМ ВДУВА ИНОРОДНОГО ГАЗА

Гапонов С.А., Смородский Б.В.

Институт теоретической и прикладной механики им.С.А.Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия

Грант РФФИ № 15-01-00866 А

АННОТАЦИЯ

Получена система уравнений для описания пограничного слоя (ПС) бинарной смеси газов в локально-автомодельном приближении. Проведены параметрические расчеты профилей пограничного слоя на плоской пластине при числах Маха 0.7 и 2. Оказалось, что действие вдува тяжелого газа на профиль плотности ПС аналогично действию охлаждения поверхности и должно приводить к повышению устойчивости ПС и затягиванию перехода.

Получены данные о влиянии вдува на коэффициенты поверхностного трения и теплопередачи. Показано, что увеличение интенсивности вдува примеси приводит к монотонному уменьшению величин поверхностного трения и теплопередачи на стенке. При этом легкий газ оказывается более эффективным охладителем поверхности.

Получены данные о поведении обобщенной точки перегиба в зависимости от параметров вдува. Оказалось, что вдув тяжелого газа приводит к движению точки перегиба к поверхности пластины, тогда как вдув легкого газа воздействует на положение точки перегиба обратным образом. Таким образом, делается заключение о возможной стабилизации сверхзвукового пограничного слоя путем вдува газа с большим молекулярным весом.

Проведенная работа является основой для планируемых точных расчетов линейной устойчивости ПС бинарной смеси газов.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в исследованиях пограничного слоя бинарной смеси диктовалась несколькими причинами. Одна из них состояла в управлении поверхностным трением и тепловыми потоками в стационарных условиях. В конце 50-и десятых и начале 60-и десятых годов прошлого столетия было показано, что для снижения поверхностного трения инъекция легкого газа эффективнее, чем инъекция воздуха. Представленные в этих исследованиях решения строились приближенно. На первом этапе не рассчитывалось явно сопротивление трения, но его можно было оценить по приведенным профилям скорости, а уравнения пограничного слоя решались при граничных условиях как на непроницаемой поверхности. При этом концентрация примеси на стенке принималась достаточно большой, хотя скорость вдува принималась равной нулю, что не логично. В последующих работах решения построены в предположении нулевой теплопередачи. Кроме того, предполагалось, что вязкость бинарной смеси не зависит от концентрации примеси и изменяется линейно с температурой. Число Шмидта принималось равным единице.

В более поздних работах исследовалось влияние свойств вдуваемого газа на уменьшение поверхностного трения и тепловых потоков. Используя простую модель твердых сфер для описания процессов столкновения, были решены уравнения движения численно для случая, когда скорость инъекции варьируется обратно пропорционально корню квадратному от продольной координаты. Анализ продемонстрировал, что вдув легкого газа приводит к уменьшению поверхностного трения и теплового потока. Кроме того, вдув газа большой теплоемкости существенно снижал тепловые потоки, но слабо влиял на поверхностное трение. Комбинация большого диаметра молекул и большой теплоемкости многоатомных газов, может быть более значительной в сокращении трения и теплопередачи, чем низкая молекулярная масса одноатомного газа, например, гелия. Из современных работ по этой проблеме можно отметить [1,2].

Подавляющее число работ связано с исследованиями турбулентного пограничного слоя бинарных смесей. Прежде всего, они проводились в интересах тепловой защиты обтекаемых высокоскоростным потоком твердых поверхностей. Большой цикл работ был проведен в [3-6] с цель снижения коэффициента восстановления.

Данная работа нацелена на изучение свойств сверхзвукового пограничного слоя бинарной смеси для управления ламинарно-турбулентным переходам. Для этого необходима подробная информация о распределении плотности и скорости потока по ламинарному пограничному слою, которая, в основном, отсутствует в процитированных работах. В частности, большую роль в потере устойчивости пограничного слоя играет невязкий критерий: произведение плотности на градиент скорости. Наличие максимума такого произведения в пограничном слое способствует потере устойчивости [7]. Полученные в результате расчетов профили скорости, плотности и температуры будут в дальнейшем использованы для исследования развития возмущений в пограничном слое бинарных смесей при сверхзвуковом обтекании проницаемой плоской пластины и других поверхностей на основе теории гидродинамической устойчивости.

ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

В работе будет рассмотрен пограничный слой двухкомпонентной газовой смеси без химических реакций. С обтекаемой поверхности вдувается примесь с молекулярным весом m_1 в основной поток газа с молекулярным весом m_2.

Основные уравнения, описывающие динамику многокомпонентной смеси можно найти в [7]. Для бинарной смеси газов там получены, кроме того, уравнения трехмерного пограничного слоя. В двумерном случае уравнения пограничного слоя в системе координат (s,y), где координата s направлена вдоль обтекаемой поверхности, y- нормально к поверхности имеют вид:

$$\rho(u\frac{\partial u}{\partial s}+v\frac{\partial u}{\partial y})=-\frac{\partial p_e}{\partial s}+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right),$$
$$\rho(u\frac{\partial h}{\partial x}+v\frac{\partial h}{\partial y})=u\frac{\partial p_e}{\partial s}-\frac{\partial q}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2, \qquad (1)$$
$$\rho(u\frac{\partial c}{\partial s}+v\frac{\partial c}{\partial y})=-\frac{\partial j}{\partial y},$$
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial y}=0, p=\frac{\rho RT}{m}=\rho\tilde{R}T,$$

где $m=\dfrac{m_1m_2}{m_1+(m_2-m_1)c}$ (2)

$$q=-\lambda\frac{\partial T}{\partial y}+(h_1-h_2)j+\frac{RT\alpha_T/m_2}{\frac{m_1}{m_2}+(1-\frac{m_1}{m_2})c}j, \qquad (3)$$

$$j=-\rho D_{12}[\frac{\partial c}{\partial y}+\frac{\alpha_T c(1-c)}{T}\frac{\partial T}{\partial y}. \qquad (4)$$

Здесь u,v—скорости смеси в s и y – направлениях; ρ— плотность; h— удельная энтальпия на единицу массы; p —давление; T— температура; q, j — потоки тепла и массы примеси; c— массовая концентрация примеси; R— универсальная газовая постоянная; μ, λ, D_{12} — коэффициенты динамической вязкости, теплопроводности и диффузии смеси; α_T — коэффициент термодиффузии.

Уравнения пограничного слоя решаются при граничных условиях:

на стенке

$$\frac{v}{u_e}=G,\frac{u}{u_e}=Gctg\lambda,(a_1T+a_2\frac{\partial T}{\partial y})=0 \qquad (5a)$$

на внешней границе пограничного слоя

$$u=u_e,\ T=T_e,\ c=0. \qquad (5b)$$

Последнее равенство соотношений (5a) получено из условия, что суммарный поток основного газа $j_2+(\rho v)(1-c)$ к пористой стенке равен нулю [3]. Для расчета вязкости бинарной смеси используются соотношениями из [8], которые имеют вид:

$$\mu=\frac{X_1\mu_1}{X_1+G_{12}X_2}+\frac{X_2\mu_2}{X_2+G_{21}X_1};$$

где $X_1=\dfrac{cm}{m_1}, X_2=\dfrac{(1=c)m}{m_2},$

$$G_{12}=\frac{[1+(\mu_1/\mu_2)^{1/2}(m_2/m_1)^{1/4}]^2}{8^{1/2}[1+m_2/m_1]^{1/2}},$$

$$G_{21}=\frac{[1+(\mu_2/\mu_1)^{1/2}(m_1/m_2)^{1/4}]^2}{8^{1/2}[1+m_2/m_1]^{1/2}},$$

$$\frac{\mu_i}{\mu_{i0}}=\left(\frac{T}{T_{i0}}\right)^{3/2}\frac{T_{i0}+S_i}{T+S_i},$$

X_i—объемная концентрация i –го вещества.

В [9] приведены формулы для расчета теплопроводности и диффузии бинарной смеси, которые для многоатомных газов можно записать в виде:

$$\lambda=\frac{X_1\lambda_1}{X_1+1.065\widetilde{G}_{12}X_2}+\frac{X_2\lambda_2}{X_2+1.065\widetilde{G}_{21}X_1}$$

где $\lambda_i=15\mu_iEu/m_i,$

$$\widetilde{G}_{ij}=\frac{[1+(\mu_2/\mu_1)^{1/2}(m_j/m_i)^{1/4}]^2}{8^{1/2}[1+m_i/m_j]^{1/2}};$$

$$D_{12}=262.8\cdot10^{-5}\frac{[T^3(m_1+m_2)/2m_1m_2]^{1/2}}{p\sigma_{12}^2\Omega^{(1,1)*}}$$

где D_{12} в см^2/сек, $\sigma_{12}=(\sigma_1+\sigma_2)/2$ в ангстремах p в атм, T в °K.

© Гапонов С.А., Смородский Б.В.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились для пограничного слоя на плоской пластине при обтекании воздухом при числе Маха M=2.0. Через проницаемую пластину вдувался инородный газ. Расчеты, прежде всего, выполнены для следующих примесей: тетрахлорметан (CCl_4), ксенон (Xe), гелий (He). Отдельные исследования проведены по влиянию отношения молекулярных весов примеси и основного газа при одинаковых теплоемкостях на распределения плотностей по сечению пограничного слоя. Все результаты представлены в безразмерном виде: физические величины отнесены к своим значениям на границе пограничного слоя, а расстояние от стенки - к толщине

$$\delta = \sqrt{x\nu_e / u_e} \ .$$

На рис. 1 показано распределение концентрации тетрахлорметана, молекулярный вес которого равен 154, по пограничному слою при разной интенсивности вдува. Можно заметить, что с увеличением интенсивности вдува концентрация примеси на стенке увеличивается, и, по-видимому, становится близкой к единице при значительной степени вдува.

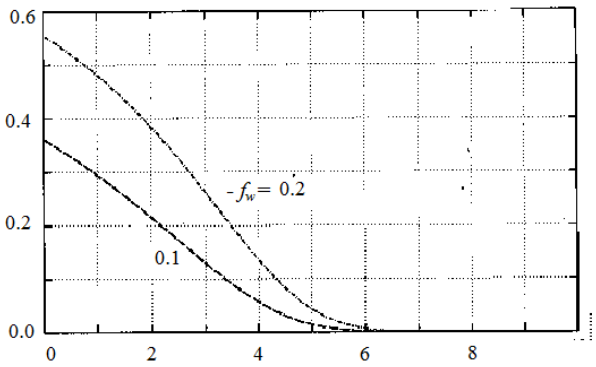

Рис. 1 Распределение массовой концентрации CCl4 по пограничному слою.

Как следствие плотность смеси на стенке по пограничному слою при вдуве тетрахлорметана повышается при увеличении интенсивности вдува в силу того, что молекулярный вес тетрахлорметана равен 154 и он существенно выше молекулярного веся воздуха. Следует при этом заметить, что профили скорости и температуры в пограничном слое слабо зависят от степени вдува из диапазона $0< -f_w <0.2$.

Влияние вдува и молекулярного веса примеси на локальное сопротивление можно проследить на рис. 2. Видно, что увеличение вдува приводит к уменьшению сопротивления независимо от молекулярного веса вдуваемого вещества. Учитывая, что молекулярные веса гелия, воздуха и ксенона равны соответственно 4, 29 и 131, можно сделать заключение об увеличении сопротивления с увеличением молекулярного веса примеси.

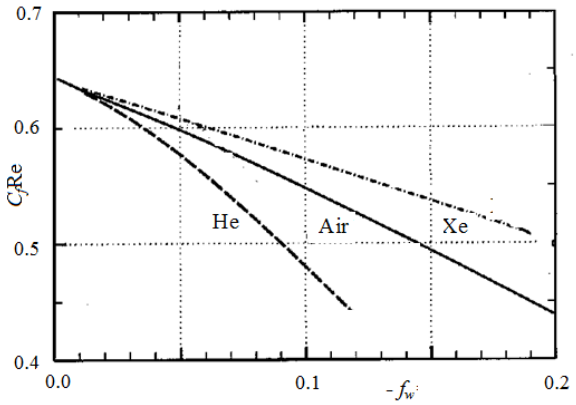

Рис. 2 Зависимость локального сопротивления трения от интенсивности вдува на адиабатической стенке при M=2.

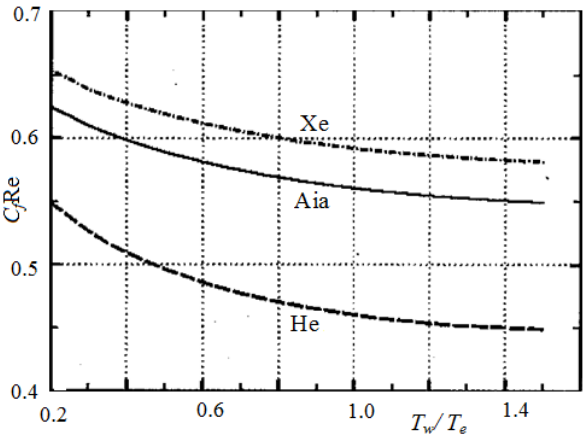

Рис. 3 Зависимость локального сопротивления трения от температуры стенки при M=2.0, $-f_w$=0.1.

На рис. 3 показана зависимость локального сопротивления от температуры стенки. Можно видеть, что с повышением Tw сопротивление трения уменьшается монотонно для всех типов примесей. Попрежнему, сопротивление трения увеличивается с увеличением молекулярного веса примеси.

Закон передачи тепла не во всем соответствует закону трения. Рис. 4 показывает влияние температуры стенки на отношение числа Стэнтон с вдувом (fw=0.1) к его значению без вдува. Видно, что только при Tw>0.36 это отношение соответствует закономерности, согласно которой снижение молекулярного веса примеси приводит к уменьшению теплопередачи через поверхность. В области Tw<0.36 примесь

гелия приводит к повышению теплового потока в сравнении со случаем вдува воздуха. Таким образом, снижение теплопередачи, достигнутые путем инъекций легкого газа имеет место для высоких значениях *Tw*. Однако при более низких значениях *Tw*, может наблюдаться противоположный эффект.

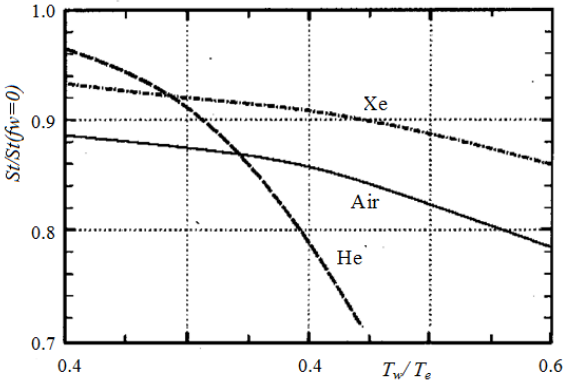

Рис. 4 Влияние температуры стенки на отношение числа Стэнтона с вдувом (*fw=0.1*) к его значению без вдува, M=0.7.

Полученные результаты по влиянию вдува примеси на сопротивление и теплоотдачу, в целом, согласуются с известными литературными данными.

Другая проблема управления состоянием пограничного слоя связана с ламинарно-турбулентным переходом. С цель снижения поверхностного трения тела при его обтекании сверхзвуковым потоком состоит в ламинаризации пограничного слоя. Одним из возможных путей ламинаризации состоит в повышении устойчивости пограничного слоя.

Приближенное значение критического числа Рейнольдса (потеря устойчивости относительно малых возмущений) можно найти в [9], которое при малых фазовых скоростях возмущений, *c,* имеет вид: $\mathrm{Re}_c \sim 1/c^4$. Таким образом, можно ожидать увеличения критического числа Рейнольдса при уменьшении *c.* Согласно невязкой теории устойчивости фазовая скорость равна скорости течения в пограничном слое, где имеет место обобщенная точка перегиба [7], $\frac{d}{dy}(\rho\frac{du}{dy}) = 0$.

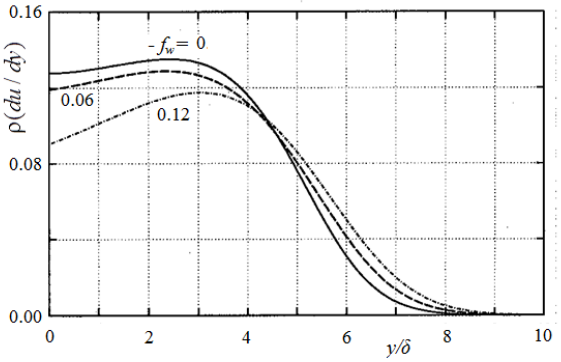

Рис. 5 Распределение параметра $\rho(du/dy)$ при вдуве гелия при M=2.0.

На рис. 5-6 показаны распределения по пограничному слою величины $\rho(du/dy)$ при вдуве гелия и тетрахлорметана. Можно заметить, с увеличением вдува гелия максимум $\rho(du/dy)$ движется в сторону больших значений *y*, и, как показывают распределения скоростей по пограничному слою, увеличению с. Наоборот, с увеличением вдува тетрахлорметана максимум $\rho(du/dy)$ движется в сторону меньших значений *y*, и, как следствие, к уменьшению величины *c*

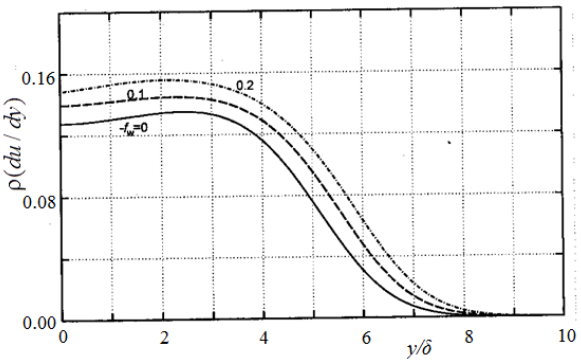

Рис. 6. Распределение параметра $\rho(du/dy)$ при вдуве тетрахлорметана при M=2.0.

Таким образом, можно сделать заключение о возможной стабилизации сверхзвукового пограничного слоя путем вдува газа с большими молекулярными весами. Следует, однако, отметить, что такое заключение может оказаться справедливым только при малых степенях нормального к стенке вдува

ВЫВОДЫ

В результате исследований были получены профили параметров пограничного слоя в зависимости от молекулярного веса вдуваемой примеси через пористую стенку.

Установлено, что вдув гелия (самый легкий газ) дает наиболее заметное сокращение коэффициента трения, что связано с его малым молекулярным весом. С увеличением молекулярного веса примеси

(например, тетрахлорметана) сопротивление трения увеличивается.

Результаты по теплопередаче неоднозначны в сравнении с данными по поверхностному трению. При достаточно высоких температурах стенки установлена аналогичная зависимость теплопередачи от вдува примеси зависимости локального трения, уменьшение молекулярного веса примеси (например, гелия) приводит к снижению теплоотдачи. В области низких температур число Стэнтона при вдуве гелия выше соответствующего значения при впрыске воздуха.

На основе приближенной зависимости критических чисел Рейнольдса устойчивости пограничного слоя и невязкой теории, согласно которой фозовая скорость наиболее усиливающихся возмущений равна скорости течения в области обобщенной точки перегиба, исследовано влияние вдува примеси на устойчивость сверхзвукового пограничного слоя при числе Маха M=2.0. Оказалось, что вдув тяжелого газа небольшой интенсивности приводит к повышению устойчивости и, как следствие, можно ожидать увеличения числа Рейнольдса ламинарно-турбулентного перехода.

Для получения более полных данных по устойчивости необходимы дополнительные расчеты на основе решения полных уравнений устойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Volchkov, E.P., Concerning the heat and mass transfer features on permeable surfaces. // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2006. – Vol. 4. – P. 755-762.
2. Волчков Э.П., Макаров М.С., Макарова С.Н. Определение тепловых и диффузионных потоков на проницаемой стенке при инородном вдуве в пограничный слой. // Современная наука. – 2011. – № 2. – С. 102-107.

   Voltchkov E. P., Makarov M. S., Makarova S. N. Definition of thermal and diffusive fluxes at the permeable wall with the foreign injection in the boundary layer. // Modern science. – 2011. –N 2. – P. 102-107.
3. Leontiev A. I., Lushchik V. G, Yakubenko A. E. Compressible Turbulent Boundary Layer on a Permeable Plate with Injection of Foreign Gas // High Temperature. – 2007. – Vol. 45. – N. 4. – P. 488–496.
4. Leont'ev A. I., Lushchik V. G., Yakubenko A. E. Temperature of a thermally-insulated permeable wall in a compressible flow. // Fluid Dynamics. – 2008. Vol. 43. – N 5. – P 799-806.
5. Lushchik V. G, and Yakubenko A. E. Friction and Heat Transfer in the Boundary Layer on a Permeable Surface with Injection of Foreign Gas. // High Temperature. – 2005. – Vol. 43. – N. 6. – P. 881–889.
6. Макарова М.С. Оптимизация температуры проницаемой стенки при вдуве инородного газа // Тепловые процессы в технике. –2012. – № 7. – С. 291-297.

   Makarova S. N. Temperature optimization of the permeable wall at an injection of the foreign gas // Thermal processes in engineering. –2012. – N 7. – P. 291-297.
7. Гапонов С.А., Г.В. Петров «Устойчивость пограничного слоя неравновесно диссоциирующего газа. — Новосибирск: Наука, 2013. – 96 С.

   Gaponov S. A., Petrov G. V. Stability of a boundary layer with the nonequilibrium gas dissociation. – Novosibirsk: Science, SB of RAS. 2013. –96 P.
8. Глумов Д.Н., Стрекалов А.В. Способ расчета динамической вязкости газов в широком диапазоне давлений. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». http://www.ogbus.ru – 2011. – №1. С. 194-209.

   Glumov D.N. , Strekalov A.V. Methods of calculating the dynamic viscosity of gases in a wide range of pressures. Electronic scientific journal "Oil and gas business"», http://www.ogbus.ru. – 2011. – N1. P. 194-209
9. Seung-Kyo Oh. Modified Lennard-Jones Potentials with a Reduced Temperature-Correction Parameter for Calculating Thermodynamic and Transport Properties: N oble G ases and Their Mixtures (He, Ne, Ar, Kr, and Xe) // Journal of thermodynamics. – 2013. –Vol. 2013. –Article ID 828620. –29P. – http://dx.doi.org/10.1155/2013/828620.