

*А.В. Дмитренко, В.Г. Попов, А.В. Викулин, Ю.И. Павлов, С.П. Колесников*

Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского, Москва, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ГОРЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ ПРИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОМ ВДУВЕ**

### **АННОТАЦИЯ**

Проведены теоретико-расчетные исследования характеристик смесеобразования и теплообмена при наличии горения топлива  $H_2+O_2$  в пристеночной дозвуковой области при тангенциальном вдуве  $H_2$  в целях определения возможности тепловой защиты стенки. Исследования выполнены на базе комплекса программ «Завеса» для персональных компьютеров в соответствии с методом, включающим двухмасштабную четырехпараметрическую модель турбулентности, с пульсациями плотности [1—7].

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Определение характеристик теплообмена и смесеобразования при вдуве инородного газа с горением остается актуальной задачей как при технической реализации, так и в теоретико-расчетных исследованиях [8—11]. Однако эти работы определяли параметры тепло- и массообмена при наличии горения в пограничном слое в основном используя схему подачи инжектируемого газа через пористую стенку. В [8] исследовался процесс горения в пограничном слое при вдуве  $H_2$  в воздушную среду через пористую стенку, то есть концентрация на стенке водорода  $C_w = \text{const}$ .

В [9] по той же расчетной схеме рассматривалась задача горения в пограничном слое  $CH_4$ . В [10] дан обзор и анализ текущего состояния экспериментальных и расчетных исследований горения в пограничном слое при использовании для инъекции пористых материалов. Отметим, что проникаемые материалы безусловно представляют интерес, но, к сожалению, их практическое применение в промышленности пока еще затруднительно в основном из-за нестабильности характеристик материала при многократных включениях. Поэтому безусловный практический интерес давно уже представляет задача охлаждения стенки в высокотемпературных средах при заградительном охлаждении, которая во многих случаях была успешно решена в отечественном авиа- и ракетостроении.

Развитые методы расчетов на основе интегральных соотношений и транспортных уравнений для корреляционных моментов второго порядка позволили решать самые разнообразные задачи по организации эффективного охлаждения стенок лопаток газовых турбин, камер и сопел [1—8, 12—30]. Тем не менее, в связи с необходимостью дальнейшего совершенствования удельных параметров изделий все более возрастает требование к высокой эффективности смесеобразования и горения, а соответственно и тепловой защите стенок.

С этой целью представляется важным знание воздействия горения на смесеобразование и на тепловую защиту при тангенциальном вдуве, наиболее распространенном в практике. Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в этой области, опубликованные в ряде работ [12—24], подтверждают сложность исследований из-за трудности, в ряде случаев, определения скорости химических реакций и ряда термодинамических параметров, в частности, химического потенциала. Некоторые из этих аспектов рассматриваются далее.

### **2. ТЕОРЕТИКО-РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ**

#### **2.1. Теоретические аспекты расчетных методов тепло- и массообмена при горении и вдуве**

На текущий момент решение расчетных задач по теплообмену при наличии горения имеют, как и большинство задач механики сплошных сред, хорошо известную математическую формулировку. Вопрос лишь сводится к методу решения: или в рамках теории интегральных соотношений, или статистическими моделями турбулентности того или иного порядка, или прямым численным моделированием. При этом применяется тот или иной численный алгоритм. Вопросы же, которые возникают о влиянии горения на процессы тепло- и массообмена, концентрируются в основном на решении проблем, связанных с различными гидродинамическими режимами течений, и особенностями протекания химических реакций изучаемой топливной пары, и взаимным влиянием обоих факторов. Поэтому, как обычно принято в практике теоретико-численных исследований, представляется целесообразным, сравнить результаты расчетов для одного и того же случая течения без наличия горения и с горением.

Далее, учитывая сложность определения действительно реализуемой цепи химических реакций или определения эквивалентной этой цепи одной глобальной реакции, целесообразно рассмотреть топливную пару достаточно изученную и представимую одной реакцией. Представляется, что такой может быть пара  $H_2+O_2$ . Эта пара обладает рядом преимуществ, позволяющих сократить число степеней свободы, определяющих некоторую расчетную неоднозначность. Реакции  $H_2+O_2$  протекают практически равновесно, быстро — число Дамкелера много больше единицы, поэтому нет необходимости вводить при проведении термодинамических расчетов температуру, определяющую «замораживание» теплофизических свойств [24]. Поэтому ве-

личины теплофизических свойств реагирующих веществ и их продуктов сгорания во всех уравнениях соответствуют равновесным значениям.

## 2.2. Уравнения для описания горения при вдуве

Для расчета вдува при наличии горения использовалась система уравнений, представленная в работах [1—7,23,25,26]. Здесь для удобства анализа получаемых результатов представим следующие уравнения:

неразрывности

$$\frac{\partial(r^n \rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(r^n (\rho u_2 + \rho F_{t1} \overline{u_1' u_2'}))}{\partial x_2} = j_w; \quad (1)$$

полной энтальпии  $I_0$

$$\begin{aligned} & \rho u_1 \frac{\partial I_0}{\partial x_1} + \left( \rho u_2 + \rho F_{t1} \overline{u_1' u_2'} \right) \frac{\partial I_0}{\partial x_2} = \\ & = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ r^n \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial I_0}{\partial x_2} + \mu \left( 1 - \frac{1}{Pr} \right) \frac{\partial \left( \frac{1}{2} u_1'^2 + \langle e \rangle \right)}{\partial x_2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \rho \overline{u_2' I_0'} + (I_1 - I_2) D_{12} \rho \left( \frac{\partial C}{\partial x_2} \right) \right] \right\} - \\ & - \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial x_2} \left\{ r^n \rho F_{t2} * \left( C_{gl} \langle e \rangle 0.5 L \frac{\partial \overline{u_1' u_2'}}{\partial x_2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - (I_1 - I_2) \frac{D_{12}}{2} \frac{\partial \overline{u_2' C'}}{\partial x_2} \right) \right\}. \quad (2). \end{aligned}$$

Здесь  $x_1, x_2$  — декартовы координаты вдоль обтекаемой поверхности;  $u_1, u_2$  — скорости вдоль  $x_1, x_2$ ;  $I, I_0$  — энтальпия и полная энтальпия  $I_0 = I + 0.5(\sum u_i^2 + 2 \cdot \langle e \rangle)$ ;  $C$  — осредненная концентрация компоненты бинарной газовой смеси;  $\rho$  — осредненная плотность;  $u_1', u_2', I_0', I', C', \rho'$  — флуктуационные составляющие осредненных величин  $u_1, u_2, I_0, I, C, \rho$ ;  $r$  — текущий радиус поверхности,  $n = 1$ ;  $j_w$  — массовый поток через стенку; значения  $F_{t1}, F_{t2}$  и константы  $C_{gl}$  приведены в [25].

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИКО-ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 3.1. Расчет тангенциального вдува через щель и пористую стенку без горения

Сравнение расчетной зависимости с данными работ [31,32] для распределения  $C_w$ , концентрации вдуваемого газа на стенке, за точкой вдува на адиабатической стенке представлено на рис. 1. В статье [31] в эксперименте осуществлялся тангенциальный вдув водорода, фреона-12, гелия в воздушный поток, а в работе [32] вдув гелия через пористую поверхность. Здесь  $C_w = F[B]$ ,  $B = (\text{Re}_{\Delta x} / \text{Re}_s)^{1.25} (\mu_0 / \mu_s)^{1.25}$ ,

$\text{Re}_s = U_s \rho_s S / \mu_s$  — число Рейнольдса по параметрам на выходе из щели высотой  $S$ ,  $\text{Re}_{\Delta x} = U_0 \rho_0 \Delta x / \mu_0$  — текущее значение числа Рейнольдса по параметрам основного потока «0»,  $\Delta x = x_1 - (x_1)_n$ , а  $(x_1)_n$  — длина начального участка вдуваемой через щель струи, на всей длине которого температура на стенке остается равной температуре газа на выходе из щели, в случае пористой стенки следует брать  $\text{Re}_s = \text{Re}_w$ . Здесь величины  $W = \rho_s U_s / \rho_0 U_0$ ,  $\text{Re}_w = (1/\mu_0) \int (j_w) dx_1$ ,  $\int dx_1 = L_p$  — длина пористого участка.

На рис. 1 штриховая линия соответствует расчету при вдуве через щель фреона-12, а зависимость 1 — расчет вдува водорода, зависимость 2 — расчету вдува гелия через щель и расчету вдува гелия через пористую поверхность (результаты расчетов оказались близкими). Как следует из графика, некоторое расслоение данных по  $C_w$  для разных вдуваемых газов, наблюдаемое при  $6 < B < 40$ , подтверждается и расчетами. Отметим, что попытки разных авторов по выбору более оптимального параметра чем  $B$  не дали результата. В области  $B > 40$  с ростом  $B$  различие в значениях  $C_w$  практически исчезает. Данные приведены для  $M < 1$ ,  $W < 1$ ,  $dP/dX_1 = 0$ .

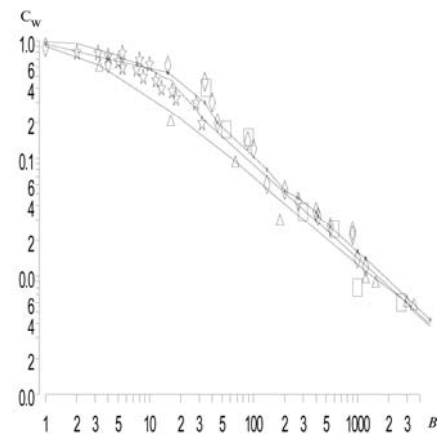


Рис.1. Зависимость концентрации вдуваемого компонента от режима его подачи и параметров набегающего потока: эксперимент: щелевой вдув [31] ★-фреон -12; Δ— водород; □ — гелий; эксперимент: пористая стенка [32] ◇ — гелий; — расчет

Результаты рис.1 показывают удовлетворительное соответствие экспериментам, что позволяет более аргументировано произвести учет влияния равновесного горения при вдуве на тепло- и массообмен.

### 3.2. Расчет тангенциального вдува через щель с учетом горения для топливной пары $\text{H}_2 + \text{O}_2$

Проведем теперь расчет процесса перемешивания, происходящего на длине  $X_{ц}$  от инжектора. Для этого проведем расчет перемешивания газообразного водорода, подаваемого на стенку, со струей кислорода, вытекающей из инжектора, т.е. рассматривается осесимметричное течение у стенки слоя во-

дорода, соприкасающегося со стенкой, и слоя кислорода над водородным слоем. Такая схема расчета представляется реальной для целого ряда технических устройств. На рис. 2 представлено сопоставление расчетной зависимости 1 с учетом выражения, определяющего горение, с распределением 2 — без учета горения. Рисунок дан в координатах  $K = f(X_i/X_{ц})$ , где  $K = (K_i/K_{Mi})$ ,  $X_i, K_i$  — текущие расстояние и соотношение компонентов на стенке,  $K_{Mi}$  — максимальное значение соотношения компонентов на стенке.

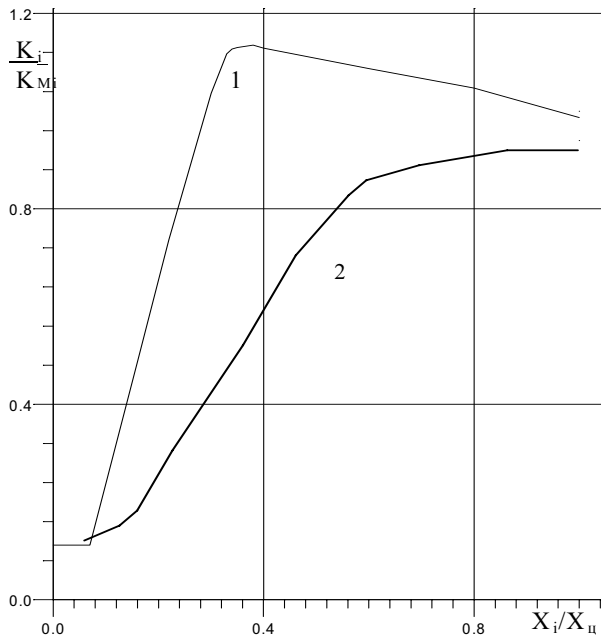


Рис. 2. Влияние горения на массообмен при вдуве

В [12] анализировался вопрос о влиянии одного из членов в уравнении энергии (2) на процесс горения, это член имеет вид:

$$(I_1 - I_2)D_{12} \left( \rho \frac{\partial C_i}{\partial x_2} + \rho' \frac{\partial C'_i}{\partial x_2} \right). \quad (3)$$

В [12] член с пульсацией плотности не рассматривался. Автор определил это выражение и отметил полную его пригодность для описания процесса горения, когда реакции протекают равновесно. Это полностью относится к кислородно-водородной паре топлива. На рис.2 расчетная зависимость 1 получена при учете этого члена. Зависимость 2 получена без учета этого члена. Как видно, член, учитывающий горение, оказывает существенное влияние как на характер, так и на величину перемешивания. Почти такое же распределение имеет зависимость для теплообмена  $q_i/q_{max} = f(X_i/X_{ц})$  на рис. 3. Расчеты с учетом (3) — кривая 1; без учета зависимости (3) — кривая 2.

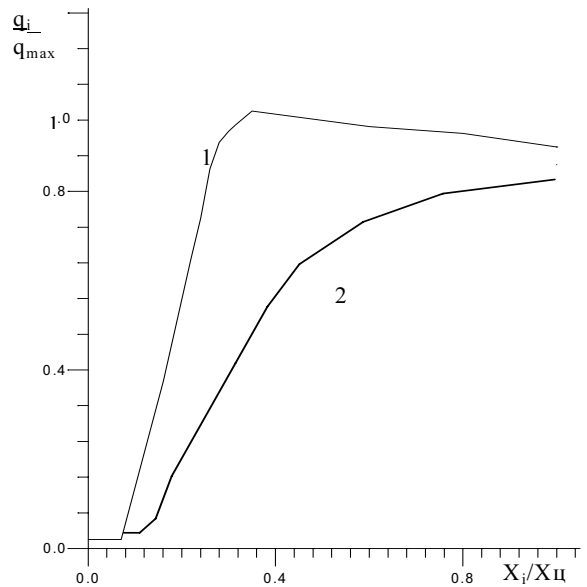


Рис. 3. Влияние горения на теплообмен при вдуве

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено теоретико-расчетное исследование влияния процесса горения на тепло- и массообмен в пристеночном слое при наличии щелевого вдува. Показано, что в предположении равновесного протекания процесса, соответствующего топливной паре  $H_2+O_2$ , влияние выражения (4), определяющее произведение химического потенциала на поток концентрации компонента бинарной смеси, оказывает как качественное, так и количественное влияние на перемешивание и теплообмен в пристеночном слое. Разница в результатах с учетом выражения (4) и без него достигает в отдельных сечениях на начальном этапе перемешивания до двух раз. Далее же вниз по потоку, в результате перемешивания, состав продуктов сгорания и плотности тепловых потоков все менее отличаются: до 5—10% как при учете члена (4), так без него.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$I_1, I_2$  — энтальпии компонент  $H_2$  и  $O_2$  соответственно;  
 $\mu$  — молекулярная вязкость;  
 $D_{12}$  — коэффициент молекулярной диффузии;  
 $\gamma$  — коэффициенты тепловой диффузии;  
 $C_p$  — теплоемкость;  
 $\overline{A'B'} = \frac{1}{\tau} \int A'B' dt$  — осреднение по времени « $\tau$ » корреляций;  
 $q$  — плотность суммарного теплового потока в стенку;  
 $M$  — число Маха;  
 $Pr$  — число Прандтля.  
 Индексы:  
 $i$  — текущее значение;  
 $w$  — параметры на стенке;  
 $max$  — максимальное значение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Dmitrenko A.V.** Some aspects of second-order transport equations for heat and mass transfer in turbulent two-phase flow. // Proc. THMT-4. 2003. P.1071—1078.
2. **Dmitrenko A.V.** Heat and mass transfer in the combustion chamber using a second-moment turbulence closure including an influence coefficient of the density fluctuation in film cooling conditions // AIAA Paper 98-3444.
3. **Дмитренко А.В.** Тепломассобмен и трение в пристенных течениях на основе духмасштабной четырехпараметрической модели турбулентности // Теплоэнергетика. 1998. № 4. С. 45—52.
4. **Дмитренко А.В.** Расчетные исследования турбулентного теплового пограничного слоя при наличии пульсаций внешнего потока // Труды 11-й конф. молодых ученых; Моск. физ.-техн. ин-т. М., 1986. Ч. 2. С. 48—52, Деп. в ВИНТИ 08.08.86, № 5698-B86.
5. **Дмитренко А.В.** Неавтомодельность течения в пограничном слое высокотемпературного газа в сопле Лавала. // Изв. вузов. Авиац. техника. 1993. № 1. С. 38—43.
6. **Dmitrenko A.V.** Film cooling in nozzles with large geometric expansion using method of integral relations and second moment closure model for turbulence // AIAA Paper 97-2911.
7. **Дмитренко А.В.** Теплообмен и трение при ламинаризации течения в пограничном слое в соплах Лавала // Теплоэнергетика. 1998. №3. С. 40—44.
8. **Волчков Э.П., Терехов В. И., Терехов В. В.** Структура пограничного слоя с горением водорода при различных интенсивностях вдува // ФГВ. 2002. № 3. С.20-29.
9. **Перепечко Л. Н.** Численное исследование влияния горения метана на тепло- и массообмен и трение в пограничном слое // ФГВ. 2003. № 3. С. 17—22.
10. **Волчков Э. П., Терехов В. И., Терехов В. В.** Структура течения, тепло- и массоперенос в пограничных слоях со вдувом химически реагирующих веществ (обзор) // ФГВ. 2004. № 1. С. 3—20.
11. **Жапбасбаев У.К., Макашев Е.П.** Диффузионное горение системы плоских сверхзвуковых струй водорода в сверхзвуковом потоке // ФГВ. 2003. № 4. С. 60—67.
12. **Иевлев В.М.** Турбулентное движение высокотемпературных сплошных сред. М.: Наука, 1979. 256 с.
13. **Основы проектирования турбин** / А.В. Деревянко, А.В. Журавлев, В.В. Зикеев и др.; Под ред. С.З. Копелева. М.: Машиностроение, 1988. 200 с.
14. **Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок** / В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин и др.; под ред. А.И. Леонтьев. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 592 с.
15. **Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике** / В.С. Авдудевский, Ю.И. Данилов, В.К. Кошкин. и др.; под ред. В.С. Авдудевский. М.: Оборонгиз, 1960. 390 с.
16. **Бородачев В. Я.** Теоретическое и экспериментальное исследование воздушно-заградительного охлаждения плоской пластины. М.: Оборонгиз, 1956. 39 с. 17.
17. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 715 с.
18. **Libbi P.A., Williams F.A.** Turbulent Reacting Flows. Springer-Verlag, Berlin, NY. 1980. 19. **Cebeci T., Bradshaw P.** Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer., Springer Verlag, 1984.
20. **Shcetz J.A.** Injection and Mixing in Turbulent Flow. Vol. 68, Progress in Astronautics and Aeronautics, Publ. AIAA, 1980.
21. **Кузнецов В.Р., Сабельников В.А.** Турбулентность и горение. М.: Наука, 1986. 276 с.
22. **Spolding D.B.** Combustion and Mass Transfer. NY, Wash: Perg. Press, 1979.
23. **Dmitrenko A.V., Sergienko A.A.** The Heat Transfer and the Friction in the Nozzles of the Supersonic Turbine in High Temperature, Pressure and Initial Turbulence Gas Flow Conditions Using Second Moment Closure Model for Turbulence. // Proc. 7th Intern. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery: ISROMAC-7., Honolulu, Hawaii, 22-26, February, 1998.
24. **Введение в феноменологическую и статистическую термодинамику** / А.В. Дмитренко, В.Г. Попов. М.: «ИАТМЭС», 2004. 216 с. ISBN 5-93271-027-6.
25. **Дмитренко А.В.** Тепломассобмен и трение при вдуве в сверхзвуковую область сопла Лавала // Вторая Рос. нац. конф. по теплообмену. 1998. Т.2. С. 136—141.
26. **Дмитренко А.В.** Статистические модели турбулентности и методы интегральных соотношений при расчете теплообмена и трения-аналогия Рейнольдса // Третья Рос. нац. конф. по теплообмену. 2002. Т. 2. С. 135—138.
27. **Дмитренко А.В.** К расчету пограничного слоя двухфазной среды // ТВТ. 2002. Т.35. № 5. С. 35—38.
28. **Launder D.B., Samaraweera D.S.A.** Application of Second-Moment Turbulence Closure to Heat and Mass Transport in Thin Shear Flow // Intern. J. of Heat and Mass Transfer 1979. Vol. 22. N12. P. 1631—1643.
29. **Ковалев В.И., Лущик В.Г., Сизов В.И., Якубенко А.Е.** Трехпараметрическая модель турбулентности численное исследование пограничного слоя в сопле с завесным охлаждением // Изв. РАН. МЖГ. 1993. №1. С. 48—57.
30. **Абрамович Г.Н., Кузмич В.Б., Секундов А.Н., Смирнова И.П.** Экспериментальное и расчетное исследование сверхзвуковой пристенной струи в спутном потоке // Изв. АН СССР МЖГ. 1972. №4. С.25—32.
31. **Burns W.K., Stollery J.L.** The influence of foreign gas injection and slot geometry on film cooling effectiveness // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1969. Vol. 12. № 8. P. 935—951.
32. **Goldstein R.J., Rask R. B., Eckert E. R. G.** Film cooling with helium injection into an incompressible air flow // Int. J. Heat Mass Transfer, 1966. Vol. 9. № 12. P. 1341—1350.