

ТУРБУЛЕНТНЫЙ ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ СО ВДУВОМ РЕАГИРУЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

Б. Ф. Бояршинов, Э. П. Волчков, В. И. Терехов, С. А. Шугов
(Новосибирск)

Пограничный слой при наличии горения представляет собой одну из современных проблем аэродинамики и тепло- и массообмена. С процессами вдува химически реагирующих веществ в пограничный слой приходится сталкиваться при горении твердых и жидких топлив, разрушении аблирующих покрытий, защите камер сгорания посредством пористого вдува через стенку горючего или окислителя и т. д.

К настоящему времени накоплен богатый теоретический и экспериментальный материал по изучению горения в факелах и топках; в то же время исследования механизма переноса импульса, тепла и массы в турбулентных пограничных слоях с химическими превращениями весьма ограничены. Имеющиеся теоретические и экспериментальные работы в этой области [1—5] трудны в обобщении и носят зачастую противоречивый характер. Последнее обстоятельство объясняется сложностью и малоизученностью процессов, происходящих в турбулентных реагирующих пограничных слоях. Расчет пограничного слоя в таких условиях требует решения сопряженных динамической, тепловой и диффузионной задач с учетом уравнений химической кинетики, радиационного теплообмена, термодиффузии, многокомпонентной диффузии и т. п. Это делает строгое решение задачи невозможным, важное значение при этом приобретает эксперимент.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию турбулентного пограничного слоя с пористым вдувом горючего, реагирующего с потоком окислителя.

Предельный относительный закон тепло- и массообмена и трения для турбулентного пограничного слоя с горением

Теоретический анализ основывается на асимптотической теории турбулентного пограничного слоя С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьева [6], предельные соотношения которой позволяют достаточно просто и без использования эмпирических констант турбулентности рассчитать коэффициенты тепло- и массопереноса и трения, а также распределение скоростей, температур и концентраций по толщине пограничного слоя. При анализе использована модель диффузионного фронта горения, предложенная в [7, 8] для горения предварительно перемешанных газов в факелах. В соответствии с этой моделью окислитель из ядра потока и горючее, вдуваемое через пористую стенку, взаимно диффундируют и реагируют с бесконечно большой скоростью на тонкой поверхности фронта горения. Процесс принимается всюду равновесным, поэтому горючее

находится лишь в зоне между фронтом реакции и пористой стенкой, а окислитель из ядра потока может достигать только фронта; продукты реакции в этом случае могут диффундировать из фронта горения к стенке и к внешней границе пограничного слоя. Таким образом, образующийся пограничный слой разбивается на зоны горючего и окислителя.

В соответствии с принятой моделью диффузионного фронта горения, пренебрегая эффектами термодиффузии и излучения, предельный интеграл асимптотической теории [6] можно разбить на две части: от пористой стенки до фронта пламени и от фронта до внешней границы пограничного слоя

$$\Psi_{\text{Re} \rightarrow \infty} = \left[\int_0^{\theta^*} \left(\frac{\rho \tilde{q}_0}{\rho_0 \tilde{q}} \right)^{1/2} d\theta + \int_{\theta^*}^1 \left(\frac{\rho \tilde{q}_0}{\rho_0 \tilde{q}} \right)^{1/2} d\theta \right]^2. \quad (1)$$

Здесь $\Psi = St/St_0$ — относительный коэффициент теплообмена; $St = q_{\text{ст}}/(h_{\text{ст}} - h_0)\rho_0 w_0$ — коэффициент теплообмена в изучаемых условиях (вдув + горение); $q_{\text{ст}}$ — тепловой поток в стенку; $h_{\text{ст}}, h_0$ — полная энтальпия на стенке и в ядре потока; $\rho_0 w_0$ — массовая скорость основного потока; St_0 — коэффициент теплообмена в стандартных условиях (обтекание непроницаемой пластины изотермическим безградиентным потоком без химических реакций); $\theta^* = (h^* - h_{\text{ст}})/(h_0 - h_{\text{ст}})$ — безразмерная полная энтальпия во фронте горения. Отношение $\tilde{q}/\tilde{q}_0$ — распределение тепловых потоков в реагирующем пограничном слое ($\tilde{q} = q/q_{\text{ст}}$); $\tilde{q}_0 = q_0/q_{0\text{ст}} = 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3$ — аппроксимация профиля относительных тепловых потоков в стандартном пограничном слое ($\xi = y/\delta$ — текущая координата, δ — толщина пограничного слоя). Можно показать, что распределение тепловых потоков в пограничном слое со вдувом реагирующих веществ будет таким же, как и при вдуве без химических реакций [6]: $\tilde{q}/\tilde{q}_0 = 1 + b_1\theta$, где $b_1 = \rho_{\text{ст}} w_{\text{ст}}/\rho_0 w_0 St$ — параметр проницаемости, $\rho_{\text{ст}} w_{\text{ст}}$ — интенсивность поперечного потока вещества на стенке. Тогда из уравнения (1) следует, что влияние химических реакций на параметры пограничного слоя будет сказываться через распределение плотности смеси газов ρ/ρ_0 по толщине реагирующего слоя. В соответствии с уравнением состояния смеси идеальных газов

$$\rho/\rho_0 = MT_0/M_0 T, \quad (2)$$

где ρ_0, T_0, M_0 — параметры в ядре течения. Кажущаяся молекулярная масса смеси газов находится из выражения

$$1/M = \sum_{n=1}^r c_n/M_n, \quad (3)$$

где c_n — массовая концентрация n -го химического соединения в рассматриваемой точке пограничного слоя.

Таким образом, для решения уравнения (1) с использованием (2), (3) необходимо установить связь между распределением температур T и c_n по толщине пограничного слоя. Принимая справедливость аналогии процессов тепло- и массообмена в химически реагирующем пограничном слое, можно записать [9]

$$(h - h_{\text{ст}})/(h_0 - h_{\text{ст}}) = (\bar{K}_i - \bar{K}_{i\text{ст}})/(\bar{K}_{i_0} - \bar{K}_{i\text{ст}}). \quad (4)$$

Здесь h — полная энтальпия газовой смеси;

$$\bar{K}_i = \sum_{i=1}^m a_{in} c_n \quad (5)$$

— обобщенная концентрация i -го химического элемента, независимо от того, в свободном или химически связанном состоянии он находится;

$$h = \sum_{n=1}^r c_n h_n = \sum_{n=1}^r \left[c_n \left(\int_0^T c_{pn} dt + h_n^0 \right) \right]; \quad (6)$$

h_n^0 — теплота образования n -го компонента. Выражение (5) представляет собой систему линейных уравнений с коэффициентами, равными массовым долям i -го элемента в n -м химическом соединении. Решение (5) устанавливает связь концентраций химических соединений c_n с концентрациями химических элементов $\tilde{K}_i$

$$c_n = \frac{\sum_{i=1}^m (-1)^{n+i} \tilde{K}_i |D_{in}|}{D}, \quad (7)$$

где D — определитель (5); D_{in} — дополнительный минор (5) без i -го столбца и n -го уравнения. Распределение обобщенных концентраций $\tilde{K}_i$ из (4) находится из выражения

$$\tilde{K}_i = \tilde{K}_{i\text{ст}} + (\tilde{K}_i^0 - \tilde{K}_{i\text{ст}}) \theta. \quad (8)$$

Значение концентрации i -го элемента на стенке $\tilde{K}_{i\text{ст}}$ найдем из уравнения сохранения массы на пористой стенке, справедливого для эффективной бинарной смеси газов:

$$(j_i)_{\text{ст}} = j_z(\tilde{K}_i)_{\text{ст}} - \rho D (\partial \tilde{K}_i / \partial y)_{\text{ст}}, \quad (9)$$

где $(j_i)_{\text{ст}} = \tilde{K}_i' j_z$ — поток i -го элемента через стенку; j_z — суммарный поток вещества через стенку; $\tilde{K}_i'$ — концентрация i -го элемента во вдуваемом газе. Преобразуя (9) и учитывая, что

$$\text{St}_g = -\rho D (\partial \tilde{K}_i / \partial y)_{\text{ст}} / \rho_0 w_0 [(\tilde{K}_i)_{\text{ст}} - (\tilde{K}_i)_0],$$

получим связь между концентрацией i -го элемента на стенке и параметром проницаемости b_i

$$(\tilde{K}_i)_{\text{ст}} = (\tilde{K}_i' b_i + \tilde{K}_i^0) / (1 + b_i). \quad (10)$$

Здесь $(\tilde{K}_i)_0$ — концентрация i -го элемента в ядре потока.

Подставляя (10) в (8) и далее в (7), найдем распределение концентраций компонентов газовой смеси в пограничном слое с горением

$$c_n = \sum_{j=1}^m \frac{(-1)^{i+n} |D_{in}| [b_i \tilde{K}_i' (1 - \theta) + \tilde{K}_i^0 (1 + b_i \theta)]}{(1 + b_i) D}. \quad (11)$$

Совместное решение (11) с (2)–(5) позволяет найти распределение плотности смеси газов в зависимости от безразмерной энтальпии для обеих зон пограничного слоя (из-за громоздкости выражений конечные результаты здесь не приводятся).

В качестве примера рассмотрим простой случай обтекания поверхности чистым кислородом с пористым вдувом в пограничный слой реагирующего водорода. Предполагая, что при этом протекает модельная реакция $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, в пограничном слое будут находиться два элемента (H, O) и три вещества (H_2 , O_2 и H_2O).

Вначале определим значение обобщенных концентраций водорода и кислорода на пористой стенке. Для этого воспользуемся соотношением (10) и соответствующими граничными условиями. Так, обобщенная концентрация водорода на границе пограничного слоя $(\tilde{K}_\text{H})_0 = 0$, а концентрация его во вдуваемом газе $(\tilde{K}_\text{H})' = 1$; в ядре потока имеется только кислород $((\tilde{K}_\text{O})_0 = 1)$, а во вдуваемом газе он отсутствует $((\tilde{K}_\text{O})' = 0)$.

Тогда значение обобщенных концентраций элементов на стенке будет определяться величиной параметра вдува b_1

$$(K_H)_{ст} = b_1 / (1 + b_1), \quad (12)$$

$$(K_O)_{ст} = 1 / (1 + b_1). \quad (13)$$

Из полученных выражений следует, что в режиме критического вдува, когда достигается оттеснение пограничного слоя ($b_1 \rightarrow \infty$), $(K_H)_{ст} \rightarrow 1$, а $(K_O)_{ст} \rightarrow 0$.

Используя (8) и значения концентраций элементов на стенке (12), (13), получим зависимость концентраций О и Н от безразмерной энтальпии

$$K_H = b_1 / (1 + b_1) \cdot (1 - \theta),$$

$$K_O = 1 / (1 + b_1) \cdot (1 - \theta) + \theta.$$

Массовую концентрацию воды в пограничном слое можно определить по следующей формуле:

$$c_{H_2O} = (1 + \alpha) / (1 + b_1) \cdot (1 + b_1 \theta). \quad (14)$$

Здесь α — массовое содержание горючего в продуктах сгорания. Этот коэффициент связан со стехиометрическим соотношением ν зависимостью

$$\alpha = \nu / (1 + \nu).$$

Для горения водорода в кислороде $\nu = 1/8$, $\alpha = 1/9$.

Концентрация кислорода O_2 в зоне окислителя рассчитывается следующим образом:

$$c_{O_2} = 1 - c_{H_2O} = \frac{b_1 - \alpha}{1 + b_1} - \frac{b_1 (1 + \alpha)}{1 + b_1} \theta.$$

По этому же уравнению определяется и концентрация водорода в зоне горючего. Аналогичным образом можно получить зависимость и для сложных условий горения (в ядре потока и во вдуваемом веществе имеется инертный газ, наличие нескольких продуктов сгорания, вдуваемый газ содержит кислород и т. п.).

Безразмерная энтальпия во фронте реагирования θ^* находилась из условия стехиометрического соотношения обобщенных концентраций окислителя и горючего (модель предполагает, что во фронте есть только продукты сгорания). Так, при горении водорода в потоке кислорода координата фронта реагирования определяется по формуле

$$\theta^* = 1 - \alpha \cdot (1 + b_1) / b_1.$$

На рис. 1 нанесена зависимость координаты фронта θ^* от параметра вдува b_1 при горении в кислороде различных веществ — H_2 , CO и C_2H_5OH (кривые 1—3 соответственно). Видно, что с уменьшением молекулярной массы горючего θ^* возрастает. Значение параметров b_1 при $\theta^* = 0$ соответствует предельному случаю — фронт реакций расположен на стенке. При меньших параметрах вдува концентрация кислорода на стенке становится больше стехиометрической, и реакция на поверхности, по всей вероятности, будет отсутствовать.

Рассмотрим другой предельный случай — режим критического вдува ($b_1 \rightarrow \infty$). Расчет показывает, что и в режиме оттеснения фронт реакции располагается внутри пограничного слоя и его положение определяется величиной стехиометрического коэффициента $\theta^* = 1 / (1 + \nu)$. Данные рис. 1 использовались в дальнейшем для нахождения пределов интегрирования уравнения (1).

Относительная функция тепло- и массообмена $\Psi = St/St_0$ рассчитывалась по уравнению (1) с использованием (2)—(5), (11) методом по-

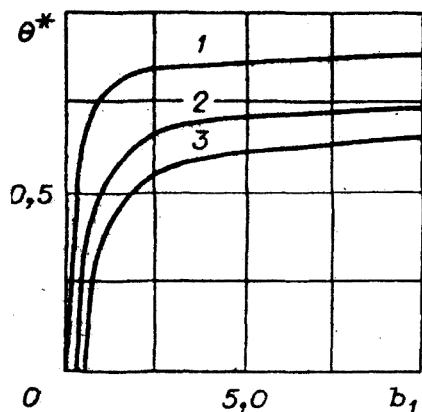


Рис. 1.

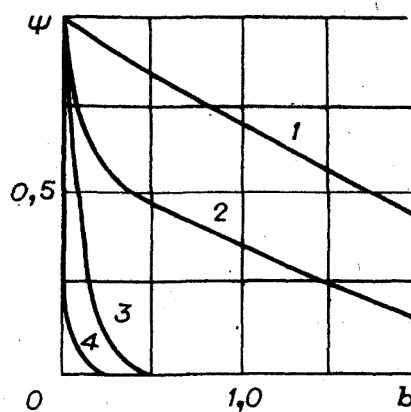
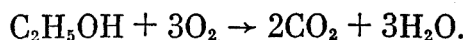


Рис. 2.

следовательных приближений. В качестве исходных данных в расчете задавались параметр проницаемости b_1 , фактор неизотермичности $\psi = T_{ст}/T_0$ и параметр, характеризующий теплоту химической реакции $K = h^0/c_{p0}T_0$, аналогичный критерию фазового перехода С. С. Кутателадзе.

На рис. 2 представлены результаты расчета относительной функции в зависимости от параметра вдува $b = \rho_{ст}w_{ст}/\rho_0w_0 \cdot St_0$ для горения этилового спирта (кривая 2) и водорода (4) в потоке воздуха. Расчет проведен для $\psi = 1$, $K = 170$ и 400 (H_2 и C_2H_5OH соответственно). При расчете процесса горения этилового спирта предполагалось, что в пограничном слое протекает химическая реакция



Данные по горению водорода практически совпали с результатами [9]. Видно, что с уменьшением M коэффициенты теплообмена, как это имеет место и при вдуве нереагирующих веществ, снижаются. Для сравнения на рис. 2 нанесены зависимости тепло- и массообмена при вдуве тех же веществ — C_2H_5OH (кривая 1) и H_2 (3), но без горения. Наличие фронта реакции значительно снижает интенсивность тепло- и массопереноса к стенке (для водорода, например, более чем в 3 раза), уменьшаются при этом и критические параметры вдува (при горении водорода $b_{кр} \sim \sim$ в 2 раза меньше, чем без горения).

Определив функцию тепло- и массообмена Ψ , можно найти профиль температур и концентраций по толщине пограничного слоя из [6]

$$\int_0^1 [\tilde{\rho}/(1 + b_1\theta)] d\theta = \sqrt{\Psi}(1 - \theta_0). \quad (15)$$

В качестве стандартного профиля энтальпий принималась степенная зависимость $\theta_0 = (\xi)^{1/7}$.

Формула (15) позволяет рассчитать профили энтальпий в окислительной зоне; для зоны горючего левая часть (15) примет вид

$$\int_{\theta^*}^1 [\tilde{\rho}/(1 + b_1\theta)]^{1/2} d\theta + \int_0^{\theta^*} [\tilde{\rho}/(1 + b_1\theta)]^{1/2} d\theta = \sqrt{\Psi}(1 - \theta_0).$$

На рис. 3 приводятся расчетные профили температур в турбулентном пограничном слое с горением этилового спирта в воздухе с различной интенсивностью вдува ($b = 0,23; 0,39; 0,75$ и $1,27$ для кривых 1–4 соответственно). Расчет проведен для температурного фактора $T_{ст}/T_0 \sim 1$.

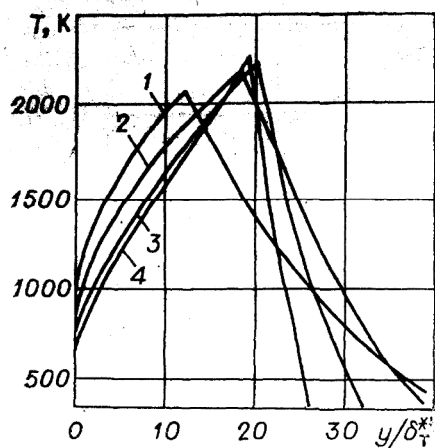


Рис. 3.

Текущая координата от стенки на рис. 3 отнесена к толщине потери энергии

$$\delta_T^{**} = \int_0^{\delta} \rho \omega (1 - \theta) d\xi.$$

С увеличением вдува параметр δ/δ_T^{**} падает за счет того, что δ растет медленнее, чем δ_T^{**} ; положение фронта горения в области малых вдувов с увеличением b смещается от стенки, а при $b > 0,4$ становится практически постоянным и равным $y/\delta_T^{**} = 19 \div 20$. Температура во фронте горения также слабо зависит от параметра вдува и составляет ~ 2200 К.

Экспериментальное исследование пограничного слоя с горением спирта

Для экспериментальной проверки разработанного метода расчета создан опытный стенд — аэродинамическая труба разомкнутого типа с сечением рабочей части $0,1 \times 0,1$ и длиной 1 м. Через нижнюю стенку канала, выполненную из пористой нержавеющей стали (пористость 60%, толщина $\delta = 0,02$ м, неравномерность проницаемости $\pm 10\%$), в пограничный слой инжестировалось горючее — 96%-ный этиловый спирт. В качестве окислителя использовался воздух при обычных условиях: скорость в ядре потока составляла 3—8 м/с. Опыты проводились для случая горения спирта, испарение которого происходило на поверхности пористой стенки. В экспериментах проводилось измерение профилей скоростных напоров, температур и состава.

Скоростные напоры измерялись датчиком Пито — Прандтля. Трубки статического давления ($d = 0,8$ мм) и полного давления ($d = 1,5$ мм) располагались в одной плоскости, параллельной пористой пластине. Для регистрации скоростных напоров использовался тензометрический датчик давления с точностью 0,01 мм вод. ст.

Известно, что наибольшую погрешность при измерении высоких температур вносят радиационные потери термозонда. В данной работе измерения проведены с компенсацией этих теплопотерь. В основу методики положен способ, предложенный в [11]. Измерения проведены не одним, а двумя идентичными зондами, один из которых помещался в вакуумную колбу, а другой — в исследуемый поток. Термозонды соединялись последовательно и через них пропусклся электрический ток. Равенство температур термозондов в потоке и вакууме соответствовало истинной температуре потока. Термозонд представлял собой платиновую проволочку диаметром 0,2 и длиной 20 мм; для определения ее температуры к ней приваривалась платина-платинородиевая термопара с $d = 0,05$ мм. Тарировочные измерения показали, что разница в показаниях термозондов с компенсацией и без компенсации лучистых потерь может составлять более 300° .

На рис. 4 нанесены распределения температур по толщине пограничного слоя y/y^* (y^* — координата фронта реакции) для трех сечений от начала пористого вдува (1 — $x = 0,09$, 2 — 0,16, 3 — 0,3 м), относительная массовая скорость на стенке в опытах равна $\rho_{ст} w_{ст} / \rho_0 w_0 = 3 \cdot 10^{-3}$. В такой обработке опытные профили достаточно хорошо обобщаются. Во фронте горения в начале канала $T^* \approx 2200$ К, что практически соответствует адиабатической температуре сгорания этанола в воздухе; далее вниз по потоку температура фронта снижается (при $x = 0,3$ м $T^* \approx 2000$ К).

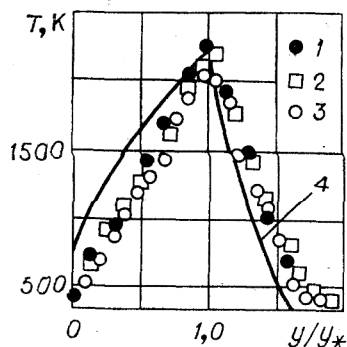


Рис. 4.

На рис. 4, 4 нанесен профиль температуры, определенный по изложенной методике. Расчет проводился для среднего в опытах $b = 0,75$. Из сопоставления следует, что экспериментальное и расчетное значения температуры во фронте горения совпадают с хорошей точностью, однако по мере удаления от него к стенке и ядру потока наблюдается некоторое расхождение. Это, по-видимому, объясняется тем, что используемая методика расчета не учитывает некоторые особенности реального процесса горения: радиационный теплоперенос, конечность чисел Рейнольдса и др.

Состав газовых смесей в пограничном слое анализировался хроматографическим методом. Для этих целей хроматограф ЛХМ-8МД переоборудован для разделения газо- и парообразных продуктов сгорания спирта. Разделялись продукты на двух последовательных колонках: CO_2 , H_2O , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CH_3CHO — на полисорбе; O_2 , N_2 , CO , H_2 , CH_4 — на колонке с молекулярными ситами. После прохождения колонки с полисорбом парообразные вещества и CO_2 вымораживались в холодильнике. Процесс разделения длился ~ 5 мин, величины концентраций веществ определялись по высоте хроматографического пика.

Наибольшую сложность представляет экспериментальное определение концентраций веществ, конденсирующихся при обычных условиях (H_2O , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, CH_3CHO); для предотвращения конденсации газовая проба в хроматограф транспортировалась по обогреваемым трубопроводам. Тарировка хроматографа по этим веществам также производилась для паровой фазы.

На рис. 5 представлены экспериментальные профили массовых концентраций компонентов в пограничном слое с горением спирта (1 — CO_2 , 2 — H_2O , 3 — N_2 , 4 — $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, 5 — O_2 , 6 — CO); концентрации других веществ (H_2 , CH_4 , CH_3CHO) оказались незначительными. Измерения проведены для $x = 0,16$ м и $j_{\text{ст}}/\rho_0 w_0 = 3 \cdot 10^{-3}$. При анализе результатов измерения необходимо отметить следующее: малая концентрация кислорода ниже зоны горения говорит о практически полном расходовании его во фронте; концентрация продуктов сгорания CO_2 и H_2O во фронте совпадает с расчетными концентрациями при стехиометрическом сгорании спирта; зона окислительных реакций локализована в узкой зоне, составляющей $\sim 1/15$ толщины пограничного слоя, что свидетельствует о правомочности использования модели фронта горения. При сопоставлении с расчетом опытных данных необходимо отметить их соответствие для большинства веществ. Исключение составляет спирт, который расходует-ся задолго до фронта, и окись углерода, наличие которой однофронтальная модель учесть не может.

Таким образом, сопоставление показало качественное совпадение теории с экспериментом, а также причины некоторых расхождений, которые необходимо учесть при дальнейшей отработке методики расчета.

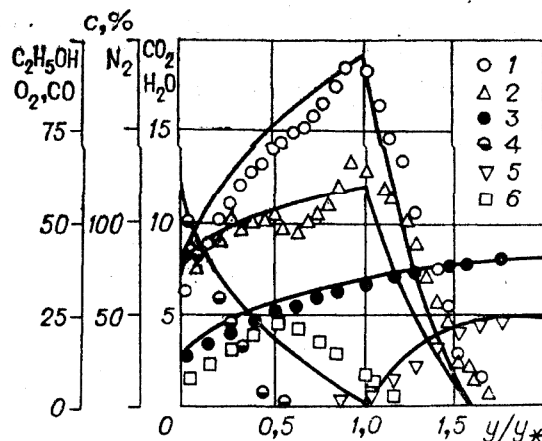


Рис. 5.

В заключение авторы выражают благодарность Е. В. Колбасову, В. И. Кондратьеву и Е. И. Синайко за помощь в создании экспериментального оборудования и отработке методик измерения.

*Поступила в редакцию
4/XI 1980*

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Т. Сергеев. Основы тепломассообмена в реагирующих средах. Минск: Наука и техника, 1977.
2. И. В. Беспалов.— В сб.: Тепло- и массоперенос. Т. 1, ч. 3. Минск, 1972.
3. S. Kikkawa, K. Yoshikawa. Heat Trans. Jap. Res., 1975, 4, 3, 37.
4. N. Kulgein. J. Fluid. Mech., 1962, 12, 3.
5. C. Woldridge, R. Mussy. Tenth Symp, (International) on Combustion, 1965.
6. С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1972, с. 342.
7. В. А. Шваб.— В сб.: Исследование процессов горения натурального топлива/Под ред. Г. Ф. Кнорре. М.: ГЭИ, 1948.
8. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1949, 19, 10.
9. Л. Лиз.— В сб.: Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций. М.: ИЛ, 1962.
10. Д. Сполдинг, Г. Ауслендер, Т. Сандерс. Расчет тепло- и массообмена в турбулентном пограничном слое на плоской пластине при больших числах M как при наличии, так и отсутствии химических реакций. Перевод ЦАГИ № 180, 1966.
11. Физические измерения в газовой динамике и при горении. М.: ИЛ, 1957.