

УДК 532.529:536.24

Влияние межфазного конвективного теплообмена на динамические характеристики двухфазной турбулентной струи**Зуев Ю.В.* , Лепешинский И.А.** , Никитин П.В.******Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия***e-mail: zuev@mai.ru****e-mail: lepehinsky@mai.ru*****e-mail: heat204@mai.ru***Аннотация**

Излагается математическая модель двухфазной турбулентной струи. С использованием этой модели проведены расчеты параметров двухфазных струй с учетом и без учета конвективного теплообмена. Полученные результаты позволили выявить влияние конвективного теплообмена между фазами на изменение скорости газа в двухфазной струе. Найдено значение начальной концентрации частиц в струе, до которого при расчете динамических характеристик струй межфазовый теплообмен можно не учитывать. При этом можно использовать математическую модель двухфазной струи, в которой температура газовой фазы рассчитывается независимо от температуры частиц.

Ключевые слова: двухфазная струя, математическая модель, конвективный теплообмен, скорости фаз

Введение

При решении ряда актуальных прикладных задач, к числу которых относится задача определения параметров двухфазной струи на выходе из сопла твердотопливного реактивного двигателя, необходимо иметь математическую модель двухфазного турбулентного струйного течения. С одной стороны, эта модель

должна иметь необходимую точность (давать результаты, близкие к реальности), а с другой стороны быть достаточно простой.

Двухфазная среда, имеющая на выходе из двигателя большую температуру, истекает в "холодную" газовую среду. При этом за двигателем образуется двухфазная неизотермическая турбулентная струя. В этой струе за счет подмешивания газа из окружающего пространства уменьшается температура газовой фазы. Возникающая в результате этого разность температур фаз приводит к конвективному теплообмену между газом и частицами, следствием чего является уменьшение температуры частиц. Но температура частиц при этом не сравнивается с температурой газа, т.е. в двухфазной струе всегда существует температурная неравновесность фаз. В зависимости от граничных условий и параметров частиц эта температурная неравновесность может иметь различную величину. Должны существовать режимы истечения из сопла двигателя, при которых различием температур фаз, и, следовательно, конвективным теплообменом, можно пренебречь. Это дает возможность упростить математическую модель двухфазной струи и рассчитывать эту струю без учета теплообмена.

Исследование влияния межфазного конвективного теплообмена в струе на температуры фаз проведено в работе [1] путем сравнения расчетов, выполненных с учетом и без учета теплообмена. В качестве критерия оценки влияния теплообмена на изменение температуры в струе было взято расстояние от сопла, на котором избыточная относительная температура газа на оси струи уменьшалась в два раза по сравнению с ее значением в начальном сечении струи (аналогичным образом, по изменению скорости, сравнивались однофазные струи). В этой работе получены данные о влиянии конвективного теплообмена между частицами и газовой фазой на изменение температуры газа в двухфазной струе в зависимости от размера, объемной концентрации частиц и температуры фаз в начальном сечении струи. Показано, что при объемной концентрации частиц $\alpha_j < 10^{-5}$ межфазный конвективный теплообмен не оказывает влияния на изменение температуры газа. При увеличении объемной концентрации частиц от 10^{-5} до 10^{-3} влияние межфазного теплообмена на изменение температуры газа в двухфазной струе возрастает, причем это влияние при

$\alpha_f \leq 10^{-4}$ не зависит от диаметра частиц, а при $\alpha_f > 10^{-4}$ усиливается с увеличением их диаметра. При увеличении температуры фаз в начальном сечении струи пренебрежение межфазным теплообменом приводит к возрастанию ошибки в расчетах, которая увеличивается с увеличением диаметра частиц. Для каждой комбинации значений начальной объемной концентрации частиц и их диаметра существует значение начального подогрева струи, начиная с которого эта ошибка остается постоянной. Выполненные расчеты указывают на то, что конвективный теплообмен влияет не только на изменение температуры фаз в струе, но и на изменение скоростей фаз. Детальные данные о влиянии теплообмена на динамические параметры двухфазной струи в [1] не приводились.

В данной работе приводятся результаты расчета, которые позволяют проследить влияние конвективного межфазного теплообмена на скорости фаз двухфазной неизотермической турбулентной струи в зависимости от начальной температуры фаз, размера частиц и их начальной концентрации.

Математическая модель двухфазной неизотермической турбулентной струи, использовавшаяся при проведении расчетов

При проведении расчетов использовалась математическая модель течения, приведенная в [1]. Эта модель включает осредненные по пространству и времени уравнения баланса массы, количества движения и энергии каждой фазы, записанные в переменных Эйлера, а также уравнения состояния фаз и уравнение, связывающее объемные концентрации газа и частиц. Замыкание системы осредненных уравнений проводится с использованием модели турбулентности двухфазных неравновесных по скоростям и температурам фаз течений [2, 3], являющейся уточнением модели турбулентности Г.Н.Абрамовича [4], в которой принималось равенство скоростей и температур газа и частиц, как в осредненном, так и в пульсационном движении. Предполагается, что все частицы в струе имеют один размер (струя монодисперсная), что позволяет исследовать поведение двухфазных струй в зависимости от диаметра частиц. В данном случае частицы в каждой точке течения имеют одинаковые скорости и поэтому отсутствуют их столкновения из-за различия

осредненных скоростей. Столкновения частиц при их участии в пульсационном движении не учитываются, т.к. пульсационные скорости частиц малы вследствие их большой плотности. Принимается, что газовая фаза, истекающая из сопла, идентична газу во внешней среде, куда истекает струя. Поэтому газовая фаза в струе является однокомпонентной.

С учетом сделанных замечаний перечисленные осредненные уравнения записываются следующим образом [1]:

- уравнение баланса массы газовой фазы

$$\frac{\partial}{\partial x} y^\beta u_f \rho_f \alpha + \frac{\partial}{\partial y} y^\beta (v_f \rho_f \alpha + \alpha \langle \rho' v' \rangle) = 0 \quad (1)$$

- уравнение баланса массы частиц

$$\frac{\partial}{\partial x} y^\beta \rho_f \alpha_f u_f + \frac{\partial}{\partial y} y^\beta \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) = 0 \quad (2)$$

- уравнение движения газовой фазы

в проекции на ось x (совпадает с осью струи)

$$u_f \rho_f \alpha_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + (v_f \rho_f \alpha_f + \alpha_f \langle \rho' v' \rangle) \frac{\partial u_f}{\partial y} = - \frac{1}{y^\beta} \frac{\partial}{\partial y} y^\beta \rho_f \alpha_f \langle u' v' \rangle - \frac{\partial p}{\partial x} - F_{cfx} \quad (3)$$

в проекции на ось y

$$\frac{\partial P}{\partial y} \cong 0 \quad (4)$$

- уравнение движения частиц

в проекции на ось x

$$\rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial u_f}{\partial y} = - \frac{1}{y^\beta} \frac{\partial}{\partial y} y^\beta \rho_f \alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle + F_{cfx} \quad (5)$$

в проекции на ось y

$$\rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + 2 \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial v_f}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial x} \rho_f (\alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle + u_f \langle \alpha'_f v'_f \rangle) -$$

$$-\frac{v_f}{y^\beta} \frac{\partial}{\partial y} y^\beta \rho_f \langle \alpha'_f v'_f \rangle - \frac{1}{y^\beta} \frac{\partial}{\partial y} y^\beta \rho_f \alpha_f \langle v_f'^2 \rangle + F_{cfy} \quad (6)$$

- уравнение энергии газовой фазы

$$u \rho \alpha \frac{\partial c_p T}{\partial x} + (v \rho \alpha + \alpha \langle \rho' v' \rangle) \frac{\partial c_p T}{\partial y} = - \frac{1}{y^\beta} \frac{\partial}{\partial y} y^\beta c_p \rho \alpha \langle T' v' \rangle - \langle u' v' \rangle \rho \alpha \frac{\partial u}{\partial y} + \\ + u \frac{\partial P}{\partial x} - F_{cfx} (u_f - u) - Q_{conv} \quad (7)$$

- уравнение энергии частиц

$$\rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial c_f T_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial c_f T_f}{\partial y} = - \frac{1}{y^\beta} \frac{\partial}{\partial y} y^\beta \rho_f \alpha_f c_f \langle T'_f v'_f \rangle - \\ - \rho_f \alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle \frac{\partial u_f}{\partial y} + Q_{conv} \quad (8)$$

- уравнения состояния фаз

$$P = \rho R T, \quad \rho_f = \text{const} \quad (9)$$

- уравнение, связывающее объемные концентрации фаз

$$\alpha + \alpha_f = 1 \quad (10)$$

При записи уравнений (1)-(10) введены следующие обозначения: x, y – оси координат; u, v – проекции вектора скорости \vec{W} на оси координат x и y ; ρ – физическая плотность; α – объемная концентрация; p – давление; \vec{F}_{cf} – сила сопротивления капель; c_p – удельная теплоемкость газовой фазы при постоянном давлении; c_f – удельная теплоемкость частиц; T – температура; Q_{conv} – удельный конвективный тепловой поток; R – удельная газовая постоянная газовой фазы. Параметры газовой фазы индексов не имеют, параметры частиц обозначены индексом f , штрихами сверху обозначены пульсационные параметры фаз, угловыми скобками – моменты корреляции пульсационных величин.

В правые части уравнений (3), (5) и (6) входят проекции силы сопротивления частиц $\vec{F}_{cf} = \frac{3}{4D_f} \alpha_f C_{Df} \rho (\vec{W} - \vec{W}_f) |\vec{W} - \vec{W}_f|$, а в правые части уравнений (7) и (8) – конвективный тепловой поток $Q_{conv} = 6\alpha_f^T \alpha_f (T_{wf} - T_f)/D_f$, отнесенные к единице объема среды. Значение коэффициента теплоотдачи α_f^T определяется по числу Нуссельта $\alpha_f^T = \lambda Nu/D_f$, величина которого рассчитывается по формуле $Nu = 2 + 0,6Re^{1/2}Pr^{1/3}$. В формулах для силы сопротивления капле, теплового потока и числа Нуссельта: C_{Df} – коэффициент сопротивления частиц; T_{wf} – температура газа на поверхности частиц; D_f – диаметр частиц; λ – коэффициент теплопроводности газовой фазы; Re и Pr – числа Рейнольдса и Прандтля.

Приведенные уравнения можно использовать для расчета плоских ($\beta = 0$) и осесимметричных ($\beta = 1$) струй.

Система уравнений (1)-(10) решается при следующих граничных условиях

$$u = u(y), \quad T = T(y), \quad u_f = u_f(y), \quad v_f = v_f(y), \quad \alpha_f = \alpha_f(y), \quad T_f = T_f(y) \quad (x=0)$$

$$u = u_e, \quad T = T_e, \quad u_f = u_{fe}, \quad \alpha_f = \alpha_{fe}, \quad T_f = T_{fe}, \quad v_f = 0 \quad (y = \infty)$$

$$v = 0, \quad v_f = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (y = 0)$$

Индексом e обозначены параметры фаз на границе струи.

Система осредненных уравнений (1)-(10) замыкается с помощью выражений для моментов корреляции пульсационных параметров фаз, которые получены с использованием модели турбулентности Л.Прандтля, распространенной на случай двухфазных течений [2, 3]:

$$\begin{aligned} \langle u'v' \rangle &= -K_u K_v l_0^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \langle T'v' \rangle = -\frac{K_v^2}{Sc_{T0}} l_0^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \langle \alpha'_f v'_f \rangle = -\frac{K_{vf} K_v}{Sc_{T0}} l_0^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial \alpha_f}{\partial y}; \\ \langle u'_f v'_f \rangle &= -K_{uf} K_{vf} l_0^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y}; \quad \langle v_f'^2 \rangle = K_{vf}^2 l_0^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2; \quad \langle T'_f v'_f \rangle = -\frac{K_{vf} K_v}{Sc_{T0}} l_0^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial T_f}{\partial y} \end{aligned} \quad (11)$$

В этих выражениях: l_0 – путь перемешивания Прандтля в однофазной струе [4]; $K_u = u'/u'_0$, $K_v = v'/v'_0$, $K_{uf} = u'_f/u'_0$ и $K_{vf} = v'_f/v'_0$; u' , v' , u'_f и v'_f – пульсационные скорости фаз

в двухфазном потоке; u'_0 и v'_0 - пульсационные скорости газовой фазы без учета влияния частиц (в момент образования моля); Sc_{T0} – турбулентное число Шмидта однофазной струи.

Для того чтобы рассчитать моменты корреляции по формулам (11), необходимо знать значения K_u , K_v , K_{uf} и K_{vf} или, что то же самое, – значения пульсационных скоростей u' , v' , u'_f и v'_f . Пульсационные скорости газа u' , v' и частиц u'_f , v'_f вычислялись с использованием модели турбулентности двухфазных течений, описанной в [2, 3]. В основу этой модели положена гипотеза Г.Н.Абрамовича о взаимодействии газового моля с находящимися в нем частицами [4], согласно которой моль начинает двигаться с пульсационными скоростями u'_0 и v'_0 и в конце «жизни» за счет взаимодействия с частицами его пульсационные скорости становятся равными соответственно u' и v' . В этот момент времени пульсационные скорости каплей будут равны u'_f и v'_f . Эти пульсационные скорости принимаются за пульсационные скорости газа и каплей в двухфазном потоке.

Краткое описание метода решения системы осредненных уравнений

Аппроксимация дифференциальных уравнений в частных производных (за исключением уравнения баланса массы газа) разностными уравнениями проводилась с использованием неявной шеститочечной конечно-разностной схемы, имеющей второй порядок точности [5]. Нелинейные конвективные члены уравнений расписывались с использованием разностей по и против потока. Система разностных уравнений решалась методом прогонки. Уравнение баланса массы газовой фазы аппроксимировалось по явной четырехточечной схеме. Расчет параметров двухфазной струи проводился послойно с переходом от слоя n к слою $n+1$ с использованием прямоугольной сетки, равномерной в направлении оси y . При удалении от начального сечения струи ее границы расширяются. Поэтому число узлов сетки при переходе от слоя n к слою $n+1$ должно возрастать. Количество точек на слое $n+1$ определялось из условия гладкого перехода всех параметров фаз к их значениям в окружающей струю среде. При достижении заданного максимального количества узлов их число уменьшалось в два раза.

Точность расчетов контролировалась по интегралу избыточного количества движения среды в целом, который должен оставаться постоянным по длине струи. Отличие значения этого интеграла в различных сечениях струи от его значения в начальном сечении струи не превышало 3,5%. Такая точность расчетов достигалась при задании максимального количества узлов расчетной сетки в поперечном направлении, равного 60. Обыкновенные дифференциальные уравнения решались методом Рунге-Кутты второго порядка.

Верификация математической модели

В [6] проведено сравнение приведенной выше математической модели с моделями Л.Б.Гавина с соавторами [7], С.Эльхобаши с соавторами [8], Л.И.Зайчика с соавторами [9] и А.Мостафы с соавторами [10]. Кроме этого все эти модели сравнивались с экспериментами [10, 11], в которых измерялись осредненные и пульсационные параметры двухфазных струй. В результате показано, что при описании осредненных параметров струйного течения все модели дают близкие результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментами. Расчеты турбулентных характеристик фаз, выполненные по перечисленным выше моделям при одинаковых граничных условиях, различаются между собой. Кривые, описывающие изменение моментов корреляции пульсационных величин фаз в поперечных сечениях струи, рассчитанные с использованием описанной выше модели турбулентности, лежат между кривыми, рассчитанными по моделям [7-10].

На рис. 1 представлены результаты теоретических расчетов по моделям [1] (кривые 1) и [7] (кривые 2) совместно с экспериментальными данными, приведенными в [12]. На этом рисунке показано изменение безразмерного импульса и безразмерной температуры газовой фазы вдоль оси двухфазной неизотермической струи, полученное в результате расчетов и определенное экспериментально авторами [12]. Результаты расчетов, изображенные кривыми 2, взяты из [12]. В этой статье приводятся результаты экспериментального исследования неизотермической воздушной струи с частицами корунда ($\rho_f=3960 \text{ кг/м}^3$) размером 50 мкм,

истекающей из горизонтальной трубы длиной 3 м и диаметром 16 мм в неподвижную воздушную среду.

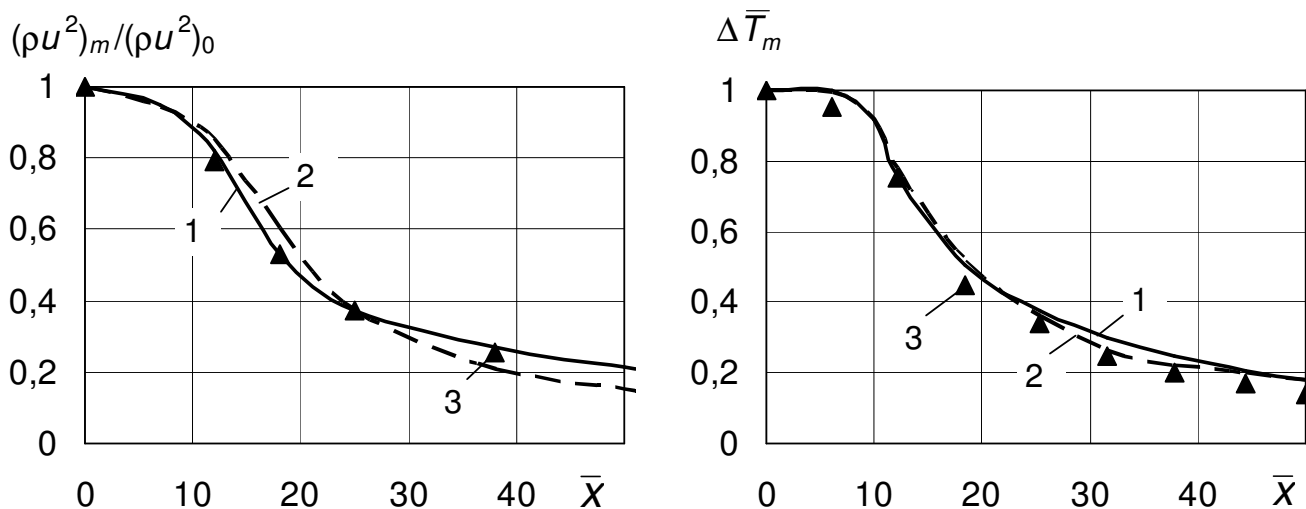


Рис. 1. Сравнение результатов расчетов по математическим моделям двухфазной струи [1] и [7] между собой и с экспериментом Л.Б.Гавина и др. [12] при массовой расходной концентрации частиц $\chi = 1,41$ и начальном подогреве $\theta = 2,36$:

1 – математическая модель двухфазной струи [1]; 2 – модель Л.Б.Гавина и др.[7];
3 – эксперимент Л.Б.Гавина и др.[12].

В данном эксперименте скорость газа на оси среза трубы, из которой истекала струя, была равна 63,5 м/с, а скорость частиц - 50 м/с. На срезе трубы минимальное значение температуры газа (687К) было на оси и максимальное значение (928К) - вблизи стенок. Струя истекала в воздух с температурой 291К. Средняя массовая расходная концентрация частиц в струе χ (отношение массового расхода частиц к массовому расходу газа через единичную площадку) была равна 1,41. Обезразмеривание импульса газовой фазы проводилось относительно его значения на оси начального сечения струи, обезразмеривание x - относительно радиуса сопла, относительная безразмерная температура находилась по формуле $\Delta \bar{T}_m = (T_m - T_e) / (T_{m0} - T_e)$ (T_m, T_{m0}, T_e - температуры газа на оси струи, на оси струи в ее начальном сечении и во внешней среде, соответственно). Точки соответствуют

экспериментальным данным [12], а кривые - результатам расчетов по моделям [1] и [7].

Из рис. 1 следует, что использовавшаяся в данной работе математическая модель двухфазной струи удовлетворительно описывает неизотермическую двухфазную струю с большой концентрацией частиц.

Результаты расчетов. Влияние межфазного конвективного теплообмена на изменение скорости газа в двухфазной струе

Для получения количественных данных о влиянии межфазного конвективного теплообмена на изменение скоростей фаз в двухфазной струе были проведены расчеты струй с одними и теми же граничными условиями с учетом и без учета теплообмена. При этом выполнены две серии расчетов, отличавшихся диаметром сопел, из которых истекали струи, и скоростями фаз на срезе этих сопел (скорости газа и частиц принимались одинаковыми). В первом случае диаметр сопла был равен 0.1 м и скорости фаз на его срезе (газа u_0 и частиц u_{f0}) 100 м/с, а во втором случае – диаметр сопла 0.2 м и скорости фаз 500 м/с. Остальные данные были одинаковыми: плотность частиц 2700 кг/м^3 , их удельная теплоемкость $880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ (плотность и теплоемкость алюминия, близкие к соответствующим параметрам углерода – 2300 кг/м^3 и $840 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, соответственно), диаметр частиц D_f изменялся от 5 до 300 мкм, температура газа T_0 и частиц T_{f0} на срезе сопла – от 500К до 1500К, объемная концентрация частиц α_{f0} – от 10^{-5} до $2\cdot 10^{-3}$. Рассматривалась затопленная струя, истекающая в воздушную среду с температурой $T_e = 288\text{К}$. Для количественной оценки влияния теплообмена на скорости фаз в струе использовалась величина $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}} = X_{0.5\Delta\bar{u}.ht} / X_{0.5\Delta\bar{u}.nht}$ – расстояние от среза сопла, при котором избыточная скорость газа на оси струи уменьшается в два раза по сравнению с ее начальным значением (ht – с учетом теплообмена; nht – без учета теплообмена). Аналогичным образом оценивалась дальнобойность однофазной струи.

Влияние конвективного теплообмена на изменение скорости газа в двухфазной струе в зависимости от начальной объемной концентрации частиц при начальной

температуре фаз 1000К можно проследить по результатам расчетов, представленных на рис. 2.

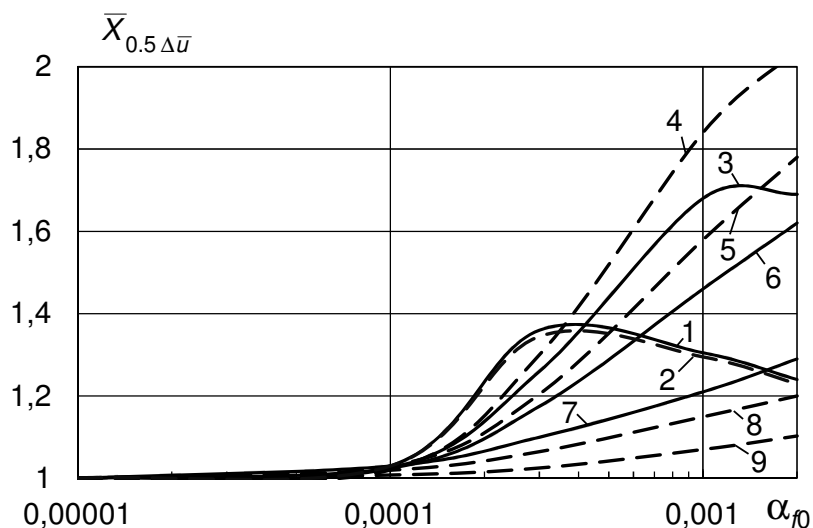


Рис. 2. Зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от объемной концентрации частиц при $T_0 = T_{f0} = 1000\text{К}$ для различных значений числа Стокса: 1, 2 – $Stk = 0.043$; 3 – 0.172 ; 4 – 0.43 ; 5 – 1.72 ; 6 – 4.3 ; 7 – 38.7 ; 8 – 43.0 ; 9 – 387.0 ; сплошные кривые – $R_0 = 0.1$ м, $u_0 = u_{f0} = 100$ м/с; пунктирные кривые – $R_0 = 0.2$ м, $u_0 = u_{f0} = 500$ м/с

На этом рисунке показана зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от объемной концентрации частиц и числа Стокса $Stk = \rho_f D_f^2 u / (36\mu r_{гр})$ (ρ_f – плотность материала частиц, D_f – диаметр частиц, u – скорость газа, μ – динамический коэффициент вязкости газа, $r_{гр}$ – радиус границы струи), учитывающего инерционность частиц. Из этого рисунка следует, что при объемной концентрации частиц $\alpha_{f0} < 10^{-4}$ не зависимо от их размера теплообмен практически не влияет на изменение скорости газа в струе. При $\alpha_{f0} > 10^{-4}$ увеличение концентрации частиц сначала приводит к увеличению величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$, а затем к ее уменьшению. Величина максимума $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ и значение концентрации частиц, при котором он достигается, зависят от числа Стокса (размера частиц). При увеличении размера частиц величина этого максимума увеличивается, и он смещается в область больших концентраций. Результаты расчетов, при проведении которых диаметры

сопел и скорости фаз на их срезе были различны, но числа Стокса были одинаковыми, практически совпадают (кривые 1 и 2).

В соответствии с рис. 2 величина параметра $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ больше единицы. Это можно объяснить следующим. При наличии межфазного теплообмена температура газа в струе (при истечении "горячей" струи в "холодный" газ) больше по сравнению со случаем отсутствия теплообмена [1]. Это влечет за собой увеличение динамического коэффициента вязкости газа и, как следствие этого, более сильное подавление частицами турбулентности газовой фазы в струе с межфазным теплообменом [3]. При этом уменьшается количество газа, поступающего в струю из внешнего пространства. В результате возрастает скорость газа во всей области течения и, в частности, на оси струи, т.е. возрастает дальность струи.

На скорость газа в двухфазной струе влияет не только температура газа, но и концентрация частиц. При увеличении концентрации частиц уменьшается интенсивность турбулентности газовой фазы [3] и к струе подмешивается меньше газа из окружающего пространства. Это приводит к увеличению скорости газа в струе. Сначала, при увеличении концентрации частиц на срезе сопла, влияние концентрации частиц на скорость газа относительно небольшое, и величина $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ увеличивается за счет увеличения температуры в струе с теплообменом по сравнению со струей без теплообмена. Но затем $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ достигает максимума и начинает уменьшаться за счет усиливающегося влияния концентрации частиц на скорость газа в двухфазной струе.

Совпадение кривых, соответствующих одному и тому же значению числа Стокса, объясняется тем, что Stk является динамическим критерием подобия и, как показано в [3], может использоваться при оценке влияния частиц на интенсивность турбулентности газовой фазы. Наряду с размером частиц при вычислении числа Стокса учитываются плотность материала частиц, скорость и динамический коэффициент вязкости газовой фазы, а также масштаб течения (радиус границы струи).

На рис. 3 показана зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от числа Стокса частиц при $T_0 = T_{f0} = 1000\text{ К}$ для четырех значений объемной концентрации частиц на срезе сопла.

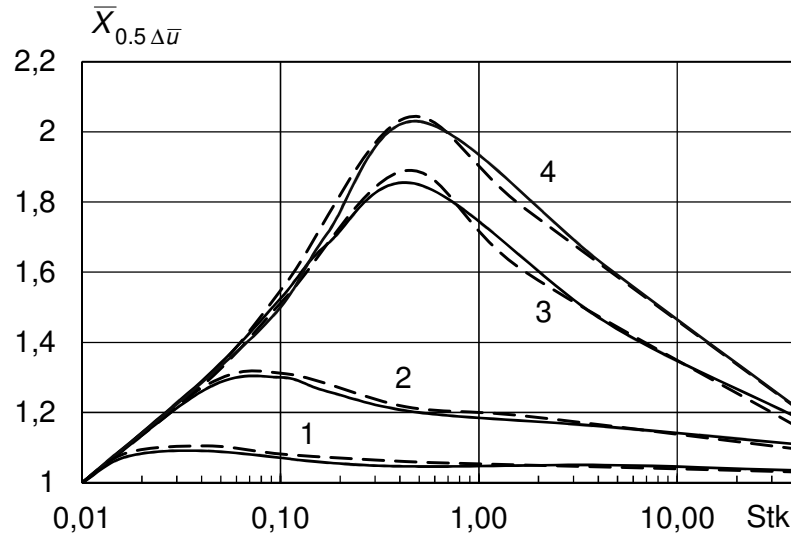


Рис. 3. Зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от числа Стокса для различных значений объемной концентрации частиц при $T_0 = T_{f0} = 1000\text{ К}$: 1 – $\alpha_{f0} = 10^{-4}$; 2 – $3 \cdot 10^{-4}$; 3 – 10^{-3} ; 4 – $2 \cdot 10^{-3}$; сплошные кривые – $R_0 = 0.1\text{ м}$, $u_0 = u_{f0} = 100\text{ м/с}$; пунктирные кривые – $R_0 = 0.2\text{ м}$, $u_0 = u_{f0} = 500\text{ м/с}$

Кривые, соответствующие расчетам с различными значениями радиусов сопел и скоростей фаз на их срезе, совпадают между собой. Отсюда можно сделать вывод, что размер сопла и начальные скорости фаз можно не учитывать при оценке влияния теплообмена на изменение скорости газа в двухфазной струе. Зависимости $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}} = f(\text{Stk})$ имеют максимумы, величины которых увеличиваются и смещаются в область больших значений Stk при увеличении начальной объемной концентрации.

Наличие максимумов зависимостей $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}} = f(\text{Stk})$ можно объяснить противоположным влиянием на величину теплового потока суммарной площади поверхности частиц и разности температур фаз. При увеличении размера частиц в случае $\alpha_{f0} = \text{const}$ их количество в единице объема среды (счетная концентрация) уменьшается и уменьшается суммарная площадь поверхности частиц. Это должно

приводить к уменьшению теплового потока от частиц к газу и уменьшению $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$. Но при этом возрастает разность температур газа и частиц, что должно способствовать росту теплового потока и увеличению $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$. Сначала при увеличении размера частиц (увеличении Stk) преобладает второй эффект, а затем – первый. Этим объясняется наличие максимумов кривых на рис. 3.

На рис. 4 представлена зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от начальной объемной концентрации частиц для трех значений температуры фаз на срезе сопла.

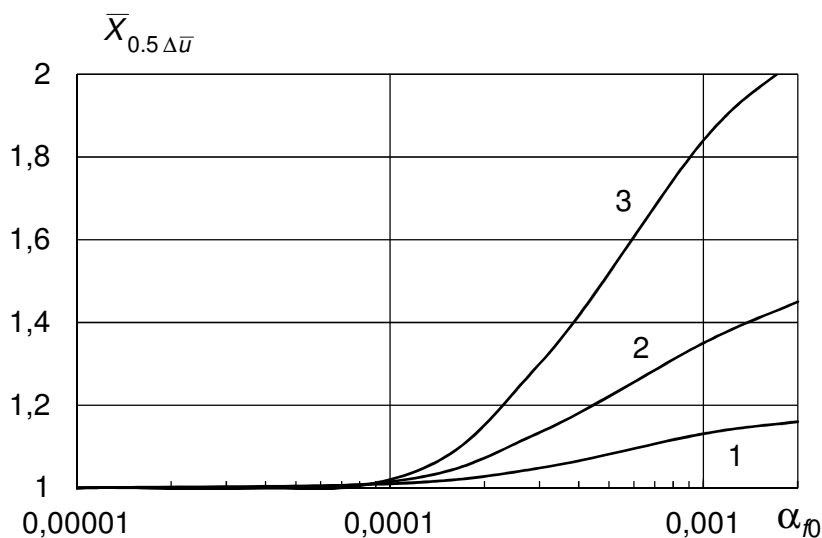


Рис. 4. Зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от объемной концентрации частиц при $Stk = 0.43$ для различных значений начальных температур фаз: 1 – 500К; 2 – 750К; 3 – 1000К (расчет выполнен для $R_0 = 0.2$ м, $u_0 = u_{f0} = 500$ м/с)

Из этого рисунка следует, что при $\alpha_{f0} < 10^{-4}$ не зависимо от начальной температуры фаз межфазный теплообмен не оказывает влияния на изменение скорости газа в двухфазной струе. При увеличении концентрации частиц величина $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ увеличивается, причем влияние теплообмена на изменение скорости в струе усиливается при увеличении начальной температуры фаз.

На рис. 5 приведена зависимость $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от начальной безразмерной температуры фаз в струе $\bar{T} = T_0/T_e$ (T_0 и T_e – температуры газа в начальном сечении

струи и в окружающей среде, соответственно) для четырех значений начальной объемной концентрации частиц. С увеличением температуры фаз на срезе сопла величина $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ растет, и чем больше величина начальной концентрации частиц, тем сильнее влияние \bar{T} на $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$.

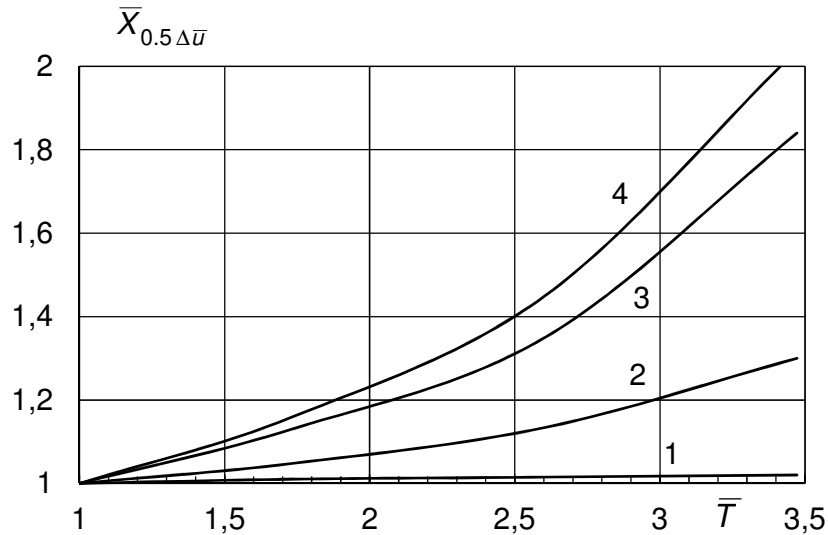


Рис. 5. Зависимость величины $\bar{X}_{0.5\Delta\bar{u}}$ от относительной начальной температуры фаз для различных объемных концентраций частиц при $Stk = 0.43$: 1 – $\alpha_{f0} = 10^{-4}$; 2 – $3 \cdot 10^{-4}$; 3 – 10^{-3} ; 4 – $2 \cdot 10^{-3}$ (расчет выполнен для $R_0 = 0.2$ м, $u_0 = u_{f0} = 500$ м/с)

Заключение

В результате проведенных расчетов получены количественные данные о влиянии конвективного теплообмена между частицами и газовой фазой на скорость газа в двухфазной струе в зависимости от объемной концентрации частиц, их размера (числа Стокса) и температуры фаз в начальном сечении струи. При объемной концентрации частиц $\alpha_f < 10^{-4}$ межфазный теплообмен не оказывает влияния на изменение скорости газа в двухфазной струе. Увеличение начальной температуры фаз приводит к существенному увеличению погрешности расчетов скорости в струе, при проведении которых не учитывается межфазный теплообмен, и эта погрешность растет с увеличением объемной концентрации частиц (при начальной температуре фаз 1500К и объемной концентрации частиц $2 \cdot 10^{-3}$

погрешность определения скорости газа может достигать 200%). Зависимость погрешности расчета скорости газа в струе при пренебрежении межфазным теплообменом от размера частиц (числа Стокса) и их объемной концентрации не является монотонной – существуют максимумы этой погрешности, соответствующие определенным значениям Stk и α_{f0} .

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-00521 А.

Библиографический список

1. Зуев Ю.В., Лепешинский И.А. Влияние межфазного конвективного теплообмена на параметры двухфазной турбулентной струи // Математическое моделирование. 2013. Т.25, №5. С.44–54.
2. Зуев Ю.В. Влияние граничных условий на характеристики турбулентности двухфазных струйных течений с фазовыми превращениями // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т.46, №3. С. 29–40.
3. Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Истомина Е.А. Выбор критериев и определение их значений для оценки характера взаимодействия фаз в двухфазных турбулентных струях // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2012. №1. С.42–54.
4. Абрамович Г.Н. О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи // Докл. АН СССР. 1970. Т. 190, №5. С.1052–1055.
5. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
6. Костюк В.В., Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Ципенко А.В., Воронецкий Н.В. Исследование процессов межфазного взаимодействия в многофазных турбулентных струях // Математическое моделирование. 1999. Т. 11, № 4. С. 59–69.
7. Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П. Турбулентные течения газозвеси. - Киев: Наук. Думка, 1987. – 240 с.

8. Elghobashi S., Abou-Arab T., Rizk M., Mostafa A. Prediction of the particle-laden jet with a two-equation turbulence model // *International Journal of Multiphase Flow*. 1984. Vol. 10, No. 6. P. 697–710.
9. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А. Моделирование горения твердого топлива. - М.: Наука, 1994. – 320 с.
10. Mostafa A.A., Mongia H.C., McDonell V.G., Samuelsen G.S. On the evolution of particle-laden jet flows: a theoretical and experimental study // *AIAA Papes*. 1987. P. 2181–2197.
11. Modarress D., Tan H., Elghobashi S. Two-Component LDA Measurement in a Two-Phase Turbulent Jet // *AIAA Journal*. 1984. Vol. 22. No 5. P. 624–630.
12. Гавин Л.Б., Мутьги А.С., Шор В.В. Численное и экспериментальное исследование неизотермической турбулентной струи с тяжелой примесью // *Инженерно-физический журнал*. 1986. № 5. С. 736–742.