

УДК 532.529

О НЕКОТОРЫХ ПРИЧИНАХ НЕМОНОТОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИСКРЕТНОЙ ФАЗЫ В ДВУХФАЗНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕ

© 2020 г. Ю. В. Зуев^{a,*}

^a *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия*

** E-mail: zuev_yuri@bk.ru*

Поступила в редакцию 23.03.2019 г.

После доработки 16.09.2019 г.

Принята к публикации 08.10.2019 г.

Приводится математическая модель двухфазного турбулентного струйного течения, осредненные уравнения которой записаны для каждой фазы в переменных Эйлера. Анализ результатов расчетов, выполненных с использованием этой математической модели, позволил выявить причины немонотонного изменения объемной концентрации дисперсной фазы вдоль оси двухфазной струи. Рассмотрено влияние на изменение концентрации частиц в струе их размера, поперечной скорости, концентрации частиц и скольжения фаз в начальном сечении струи. Показано, что перечисленные граничные условия являются причиной немонотонного изменения объемной концентрации частиц в двухфазной струе только при значении числа Стокса, рассчитанном по параметрам фаз в начальном сечении струи, большем 0.14–0.15. При меньших значениях числа Стокса, когда частицы можно считать пассивной примесью, их объемная концентрация в струе монотонно уменьшается вдоль оси струи так же, как концентрация примеси в газовой струе переменного состава.

Ключевые слова: двухфазная турбулентная струя, математическая модель, результаты расчетов, локальное увеличение концентрации частиц, число Стокса

DOI: 10.31857/S0568528120020152

Двухфазные турбулентные струйные течения широко используются в различных областях техники: при организации процесса смесеобразования в камерах сгорания реактивных двигателей, в аппаратах химического машиностроения, в технологических установках нанесения покрытий, абразивной обработки поверхностей и т.д. Во многих случаях необходима информация о распределении дискретной фазы по объему струи. В однофазных газовых струях концентрация примеси всегда имеет максимум на срезе сопла: при удалении от сопла она монотонно уменьшается вдоль оси струи; так же изменяется эта концентрация в поперечном сечении струи при удалении от ее оси.

Экспериментальные исследования двухфазных струй с твердыми частицами [1, 2], проведенные в Институте термодинамики и электрофизики АН Эстонской ССР, впервые выявили немонотонный характер изменения объемной концентрации частиц вдоль оси этих струй. Оказалось, что вблизи начального сечения струи могут существовать области с объемной концентрацией частиц, превышающей ее значение в начальном сечении струи (в [1] этот эффект назван “шнурованием”).

В последующие годы стали появляться публикации, в которых делались попытки объяснить это явление. В частности, в статье [3] приводятся экспериментальные данные, в соответствии с которыми на характер изменения объемной концентрации частиц в струе влияют их размер, концентрация и скольжение фаз в начальном сечении струи, а также делается предположение о связи немонотонного изменения объемной концентрации частиц вдоль оси струи с их поперечным перемещением, вызванным взаимодействием со стенками канала, из которого истекает струя. В статье [4] отмечается, что наряду с начальным скольжением фаз на распределение частиц в двухфазной струе существенное влияние оказывает форма поперечного поля концентрации частиц в начальном сечении струи, зависящая от характера взаимодействия частиц со стен-

ками трубы. Экспериментальные исследования [5] позволили выявить влияние размера, концентрации частиц, комбинации материалов пары «частица-стенка» на поперечные поля параметров фаз в выходном сечении длинной трубы, которое является начальным сечением струи. В [6, 7] предпринимаются попытки объяснить возникновение поперечной скорости частиц в трубе, которая сохраняется и в струе.

В статье [6] в качестве причины поперечного перемещения частиц называется наличие поперечного градиента их осредненной концентрации в трубе, а в [7] – сила Магнуса, действующая на частицы, столкнувшиеся со стенкой канала. Фактически, в работах [6, 7] делаются попытки определить расчетным путем граничные условия для осредненной поперечной скорости частиц в струе, но в явном виде вопрос о необходимости задания граничных условий для этой скорости при решении уравнений двухфазной струи (поперечная скорость несущей, газовой, фазы определяется из решения уравнения баланса массы этой фазы) не рассматривается. Недостатком перечисленных исследований является то, что в них не проведено обобщение полученных экспериментальных данных, а рассмотрены только отдельные факторы, влияющие на характеристики двухфазной струи.

С появлением новых математических моделей двухфазных турбулентных течений появилась возможность более детального исследования условий увеличения концентрации частиц вблизи начального сечения двухфазной турбулентной струи. Результаты таких исследований содержатся в публикациях [8–10].

В статье [8] приводится математическая модель двухфазной струи, в которой несущей фазой является газ, а дискретной фазой – твердые или жидкие частицы, не взаимодействующие друг с другом. Эту модель можно считать развитием модели [11], в которой описание движения газовой и дискретной фаз проводится в переменных Эйлера. При выводе осредненных уравнений дискретной фазы ее мгновенные параметры осредняются с использованием плотности вероятности распределения частиц по координатам, скоростям и температурам частиц, а осредненные уравнения газовой фазы получаются осреднением мгновенных уравнений по ансамблю турбулентных реализаций. В отличие от монографии [11] в [8] используется модель турбулентности дискретной фазы, включающая дифференциальные уравнения переноса рейнольдсовых напряжений, что позволило отказаться от гипотезы турбулентной вязкости Буссинеска. В результате расчетов двухфазных струй, выполненных при нулевой поперечной скорости частиц в их начальных сечениях, получены количественные данные о влиянии размера, объемной концентрации и плотности материала частиц на геометрические и кинематические параметры этих струй. В статье отмечается, что для мелких частиц эффекта шнурования не наблюдается, для промежуточного размера частиц кривая изменения концентрации частиц вдоль оси струи имеет волновой характер, в случае крупных частиц может быть монотонное уменьшение концентрации частиц вдоль оси струи. При этом отсутствуют критерии, позволяющие оценить “крупность” частиц.

В статьях [9, 10] приводятся результаты численного моделирования двухфазной струи, истекающей из трубы. Расчет параметров газовой фазы проводится прямым численным моделированием (DNS), расчет параметров частиц – методом Лагранжа. Результаты расчетов представляются в безразмерном виде, для оценки инерционности частиц используются два числа Стокса $Stk_0 = \rho_f D_f^2 u_{m0} / (18\mu R_0)$ и $Stk_m = \rho_f D_f^2 u_m / (18\mu r_{1/2})$ (в этих формулах используются обозначения, принятые в данной статье: ρ_f и D_f – плотность и диаметр частиц; μ – динамический коэффициент вязкости газа (ламинарный коэффициент переноса); u_{m0} – скорость газа на оси начального сечения струи радиусом R_0 ; u_m – скорость газа на оси струи в сечении с радиусом $r_{1/2}$, определенным по половине скорости газа). Проведенные расчеты параметров двухфазной струи, истекающей из трубы, в диапазоне чисел Стокса Stk_0 от 2 до 128 показали, что во всех рассмотренных случаях наблюдается немонотонное изменение объемной концентрации частиц вдоль оси струи, а характер этого изменения зависит от величины числа Стокса Stk_0 , т.е. от инерционности частиц.

К сожалению, в исследованиях [9, 10] не рассматриваются причины возникновения эффекта шнурования. В статье [8] увеличение концентрации частиц на оси струи объясняется немонотонным характером изменения турбулентной энергии газа в осевом и радиальном направлениях на начальном участке двухфазной струи.

Из приведенного краткого обзора литературы следует, что причинами местного увеличения объемной концентрации частиц в двухфазной струе могут быть как осредненная поперечная скорость частиц в ее начальном сечении (актуально для струй с твердыми частицами), так и осо-

бенности движения частиц в турбулентной струе при отсутствии этой скорости (актуально для газочапельных струй). При этом объяснения этого эффекта в литературе нет.

Цель данной работы заключается в объяснении механизмов возникновения эффекта шнуrowания и выявлении условий, при которых этот эффект отсутствует. При этом рассматриваются такие факторы, оказывающие согласно экспериментальным данным влияние на характер изменения концентрации частиц в струе, как размер частиц, скольжение фаз, наличие поперечной скорости частиц и величина их концентрации в начальном сечении струи. Для достижения поставленной цели проводятся расчеты двухфазной струи при различных граничных условиях с использованием приведенной ниже ее математической модели.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХФАЗНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ И МЕТОД РАСЧЕТА

Математическая модель двухфазного турбулентного струйного течения включает осредненные по пространству и времени уравнения, описывающие движение каждой фазы в переменных Эйлера, а также выражения для моментов корреляции пульсационных параметров фаз, входящих в осредненные уравнения.

В связи с тем, что данная работа посвящена решению конкретной задачи – изучению влияния ряда граничных условий в начальном сечении двухфазной струи на изменение объемной концентрации дискретной фазы в этой струе, можно сделать ряд допущений, упрощающих математическую модель струйного течения. В частности принимается, что частицы являются монодисперсными с постоянным размером во всей области течения, течение изотермическое и изобарическое (свободная затопленная струя), физические параметры газа в струе и в окружающей среде одинаковы (газовую фазу можно считать однокомпонентной). Условия изотермичности, изобаричности и постоянного состава газовой фазы позволяют не учитывать в уравнениях моменты корреляции $\langle \alpha'v' \rangle$, $\langle \rho'v' \rangle$ и градиент давления $\partial p / \partial x$. Так как в статье рассматриваются двухфазные струи, объемная концентрация в которых не превышает 1.2×10^{-3} , то согласно [12] взаимодействие частиц друг с другом не учитывается. Струйное течение считается стационарным и осесимметричным.

Вывод осредненных уравнений проводится с использованием процедур осреднения по пространству по методу Р.И. Нигматулина [13] и осреднения по времени по методу О. Рейнольдса [14] с последующей оценкой порядка членов полученных уравнений [14]. В результате, с учетом приведенных выше допущений, система осредненных уравнений, описывающих течение в двухфазной струе, включает следующие уравнения, записанные в цилиндрической системе координат x, r :

– баланса масс газовой фазы и частиц

$$\frac{\partial \alpha u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \alpha v}{\partial r} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \alpha_f u_f + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) = 0 \quad (1.2)$$

– движения газовой фазы и частиц

$$\rho \alpha u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \alpha v \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \rho \alpha \langle u'v' \rangle - F_{cfx} \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (1.4)$$

$$\rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial u_f}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \rho_f \alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle + F_{cfx} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + 2 \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial v_f}{\partial r} = & -\frac{\partial}{\partial x} \rho_f (\alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle + u_f \langle \alpha'_f v'_f \rangle) - \\ & - \frac{v_f}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \rho_f \langle \alpha'_f v'_f \rangle - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \rho_f \alpha_f \langle v_f'^2 \rangle + F_{cfr} \end{aligned} \quad (1.6)$$

– состояния фаз

$$p = \rho RT, \quad \rho_f = \text{const} \quad (1.7)$$

– уравнение, связывающее объемные концентрации фаз

$$\alpha + \alpha_f = 1 \quad (1.8)$$

При записи уравнений (1.1)–(1.8) введены следующие обозначения: x, r – оси цилиндрической системы координат, x направлена вдоль оси струи; u, v – проекции вектора скорости на оси координат x и r ; ρ – физическая плотность; α – объемная концентрация; p – давление; F_{cfx}, F_{cfr} – проекции силы сопротивления частиц на оси координат x и r ; R – удельная газовая постоянная. Параметры газа индексов не имеют, параметры частиц обозначены нижним индексом f , штрихами сверху обозначены пульсационные параметры фаз, угловыми скобками – моменты корреляции пульсационных величин.

Сила сопротивления частиц, приходящаяся на единицу объема среды, рассчитывается по формуле [15]

$$\mathbf{F}_{cf} = \frac{3}{4D_f} \alpha_f C_{Df} \rho (\mathbf{W} - \mathbf{W}_f) |\mathbf{W} - \mathbf{W}_f|$$

в которой: \mathbf{W} и \mathbf{W}_f – векторы скорости газа и частиц соответственно; D_f – диаметр частиц; C_{Df} – коэффициент сопротивления частиц, определявшийся по формуле $C_{Df} = 0.32 + 4.4/\sqrt{\text{Re}} + 24/\text{Re}$ [15]. Исходя из решаемой задачи, особенностей струйного течения и значений параметров фаз в начальном сечении струи, при расчете коэффициента сопротивления частиц не учитывались степень нестационарности обтекания частиц газом, сжимаемость и разреженность газовой фазы, а также отличие формы частиц от сферической формы. Поправка на стесненность обтекания частиц при расчете C_{Df} не вводилась, так как при максимальном значении объемной концентрации дискретной фазы порядка 10^{-3} , рассмотренной в проведенном исследовании, коэффициент, учитывающий это влияние, согласно [13] равен: $\psi_\alpha = (1 - \alpha_f)^{-2.7} = 1.003$.

Система уравнений (1.1)–(1.8) решается при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} u &= u(r), & u_f &= u_f(r), & v_f &= v_f(r), & \alpha_f &= \alpha_f(r), & x &= 0 \\ u &= u_e, & u_f &= u_{fe}, & v_f &= 0, & \alpha_f &= \alpha_{fe}, & r &= \infty \\ v &= 0, & v_f &= 0, & \partial u / \partial r &= 0, & r &= 0 \end{aligned}$$

Индексом e обозначены параметры фаз на границе струи.

Приведенная математическая модель допускает наличие внешнего по отношению к струе двухфазного потока, расчет которого позволяет найти граничные условия для расчета струи. Считается, что в этом потоке турбулентность отсутствует, и он движется параллельно оси струи. Для его расчета используются уравнения, полученные для одномерного течения из уравнений (1.1)–(1.8) и являющиеся обыкновенными дифференциальными уравнениями. В данной работе рассматриваются двухфазные свободные затопленные струи, истекающие в газовую среду, и поэтому граничные условия для скоростей фаз и концентрации частиц на границе струи записываются следующим образом: $u_e = u_{fe} = \alpha_{fe} = 0$.

Система осредненных уравнений, описывающих двухфазную струю, замыкается с помощью выражений для моментов корреляции пульсационных параметров фаз

$$\begin{aligned} \langle u'v' \rangle &= -K_u K_v l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \frac{\partial u}{\partial r}, & \langle u'_f v'_f \rangle &= -C_u K_{uf} K_{vf} l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \frac{\partial u}{\partial r} \\ \langle \alpha'_f v'_f \rangle &= -\frac{C_{\alpha f} K_{vf} K_v}{Sc_T} l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \frac{\partial \alpha_f}{\partial r}, & \langle v_f'^2 \rangle &= K_{vf}^2 l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \end{aligned} \quad (1.9)$$

В выражениях (1.9): $K_u = u'/u'_0$, $K_v = v'/v'_0$, $K_{uf} = u'_f/u'_0$ и $K_{vf} = v'_f/v'_0$; u', v', u'_f и v'_f – пульсационные скорости фаз в двухфазном потоке; Sc_T – турбулентное число Шмидта (для круглой струи равно 0.8 [16]); $C_u, C_{\alpha f}$ – коэффициенты (при проведении расчетов приняты равными 1); l – путь перемешивания Прандтля, определяемый по формуле $l = \sqrt{B} |\Delta u_{\max} / (\partial u / \partial r)_{\max}|$ [16] (B – константа, равная 0.013; Δu_{\max} и $(\partial u / \partial r)_{\max}$ – максимальные значения разности продольных скоростей и

производной продольной скорости газа в рассматриваемом сечении струи); u'_0 и v'_0 – пульсационные скорости газовой фазы, определяемые по формулам $u'_0 = l|du/dt|$ и $v'_0 = Ku'_0$; K – эмпирический коэффициент для круглой струи, равный 0.7 [16].

Пульсационные скорости фаз u' , v' , u'_f и v'_f , входящие в выражения (1.9), определяются с помощью модели турбулентности, изложенной в [17]. В этой работе рассматривается движение газового объема (аналога вихревого образования), через который перемещаются частицы вследствие различия в скоростях газа и частиц. Размер этого объема, назовем его “вихрем”, принимается равным пути перемешивания Прандтля l , связанного с макромасштабом и интегральным масштабом турбулентности [18]. Считается, что этот объем формируется в области струи, в которой определяются пульсационные скорости, и при вычислении продольных и поперечных пульсационных скоростей фаз рассматривается его движение в течение времени $\tau = l/u'_0$ [17] с разными начальными условиями. В случае изотермического изобарического течения движение вихря и частиц, перемещающихся через него, описывается уравнением изменения количества движения вихря при его взаимодействии с частицами, уравнением движения частиц в вихре, уравнениями состояния фаз и уравнением, связывающим объемные концентрации фаз в вихре.

Система перечисленных уравнений интегрируется по времени от 0 до τ при следующих начальных условиях: при расчете продольных пульсационных скоростей фаз – ($t = 0$): $u_{in}^{\circ} = u + u'_0$, $v_{in}^{\circ} = v$, $\langle \alpha_f \rangle_v = \alpha_f$, $u_f^{\circ} = u_f$, $v_f^{\circ} = v_f$ и при расчете поперечных пульсационных скоростей фаз – ($t = 0$): $u_{in}^{\circ} = u$, $v_{in}^{\circ} = v + v'_0$, $\langle \alpha_f \rangle_v = \alpha_f$, $u_f^{\circ} = u_f$, $v_f^{\circ} = v_f$ (верхним индексом “градус” обозначены мгновенные значения параметров, нижним индексом in – значения скоростей при $\tau = 0$, индексом v – осредненная по объему вихря объемная концентрация частиц). Осредненные величины скоростей фаз и концентрации частиц берутся в точках потока, в которых вычисляются пульсационные скорости. В результате интегрирования по времени уравнений, описывающих движение вихря и частиц в нем, получаются мгновенные скорости фаз в конечный момент τ существования вихря u° , v° , u_f° и v_f° . Пульсационные скорости находятся как разность между этими мгновенными и осредненными скоростями: $u' = u^{\circ} - u$, $v' = v^{\circ} - v$, $u'_f = u_f^{\circ} - u_f$, $v'_f = v_f^{\circ} - v_f$.

Аппроксимация дифференциальных уравнений в частных производных (за исключением уравнения баланса массы газа) разностными уравнениями проводится с использованием неявной шеститочечной конечно-разностной схемы, имеющей второй порядок точности [$O(\Delta x)^2 + O(\Delta y)^2$] (схема Кранка–Николсона с весовым коэффициентом 1/2) и являющейся безусловно устойчивой [19]. Уравнение баланса массы газовой фазы аппроксимируется по явной четырехточечной схеме. Обыкновенные дифференциальные уравнения решаются методом Рунге–Кутты. Подробное описание использовавшегося метода расчета двухфазной струи и результаты его верификации приведены в монографии [20].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДВУХФАЗНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИ НАЛИЧИИ ПОПЕРЕЧНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ В НАЧАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ЭТОЙ СТРУИ

В качестве граничных условий при проведении этих расчетов взяты данные из статьи [21], посвященной экспериментальному исследованию изотермической свободной воздушной струи с частицами корунда ($\rho_f = 3950 \text{ кг/м}^3$) размером 23 и 32 мкм, истекающей из длинной трубы диаметром 15.2 мм в неподвижную воздушную среду. В эксперименте с помощью лазерного анемометра измерялись скорости фаз и объемная концентрация частиц на оси и в поперечных сечениях струи. Средняя скорость газовой фазы на срезе трубы равнялась 30 м/с, средняя скорость частиц – 30 м/с (на оси трубы скорость частиц составляла 36 м/с). Расходная массовая концентрация частиц (отношение массового расхода частиц к массовому расходу газа) при проведении этого эксперимента была относительно высокой – 0.62, что соответствует объемной концентрации 2×10^{-4} .

В экспериментах [21] поля поперечной скорости частиц $v_f = v_f(r)$ в начальном сечении струи не измерялись. В данной работе эти поля были получены путем сравнения результатов расчетов двухфазной струи с результатами эксперимента. В случае двухфазной струи с частицами размером 23 мкм удовлетворительное совпадение расчетов с экспериментом наблюдается при использовании следующего полинома, описывающего в безразмерном виде изменение поперечной скорости частиц в начальном сечении струи: $v_f^* = 0.015950r^* - 0.059950r^{*2} - 0.011275r^{*3}$ ($v_f^* =$

$= v_f/u_{f0}$; $r^* = r/R_0$; u_{f0} – скорость частиц на оси начального сечения струи; R_0 – радиус этого сечения). Определенная таким образом поперечная скорость частиц обозначается v_f^{*0} . Для выявления влияния поперечной скорости частиц на распространение двухфазной струи были проведены расчеты с различными поперечными скоростями частиц в ее начальном сечении: $v_f^* = 0$; $0.5v_f^{*0}$; v_f^{*0} ; $1.5v_f^{*0}$. Результаты расчетов в безразмерном виде представлены на рис. 1: на рис. 1а, 1б показано изменение объемной концентрации и продольной скорости частиц вдоль оси струи, а на рис. 1в, 1г – изменение этих параметров частиц в поперечном сечении струи на расстоянии $x^* = x/R_0 = 33$ от ее начального сечения.

На этой фигуре используются обозначения: $u_{fm}^* = u_{fm}/u_{fm0}$; $\alpha_{fm}^* = \alpha_{fm}/\alpha_{fm0}$; $u_f^* = u_f/u_{fm}$; $\alpha_f^* = \alpha_f/\alpha_{fm}$; $x^* = x/R_0$; $r^* = r/R_0$; u_{fm} , α_{fm} – продольная скорость и объемная концентрация частиц на оси струи; u_{fm0} , α_{fm0} – продольная скорость и объемная концентрация частиц на оси начального сечения струи; r , R_0 – радиусы текущего и начального сечений струи. В данном случае число Стокса $Stk_0 = \rho_f D_f^2 u_{m0} / (36\mu R_0)$ равно 15.

Результаты расчетов двухфазной струи с частицами размером 32 мкм приведены на рис. 2. На рис. 2а изображено изменение вдоль оси струи объемной концентрации частиц, а на рис. 2б – изменение их продольной скорости. Обозначения такие же, как на рис. 1. При выполнении этих расчетов поперечная скорость частиц в начальном сечении струи задавалась полиномом $v_f^{*0} = 0.9480 \times 10^{-2} r^{*2} - 0.02148 r^{*2} - 0.3576 \times 10^{-5} r^{*3}$. Также как и в случае частиц 23 мкм, расчеты проводились для четырех значений этой скорости: $v_f^* = 0$; $0.5v_f^{*0}$; v_f^{*0} ; $1.5v_f^{*0}$. Этому случаю соответствует число Стокса $Stk_0 = 29.4$.

Из рис. 1 и 2 следует, что величина поперечной скорости частиц в начальном сечении струи оказывает существенное влияние на изменение объемной концентрации частиц в струе; при этом влияние этой скорости на изменение продольной скорости частиц незначительно. Немонотонность изменения объемной концентрации частиц вдоль оси струи усиливается при увеличении начальной поперечной скорости частиц.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДВУХФАЗНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПОПЕРЕЧНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ В НАЧАЛЬНОМ СЕЧЕНИИ ЭТОЙ СТРУИ

В статьях [9, 10] на основании анализа изменения скоростей фаз и числа Стокса Stk_m вдоль оси струи сделан вывод о том, что, начиная с некоторого расстояния от среза трубы, при котором $Stk_m = \rho_f D_f^2 u_m / (18\mu r_{1/2}) \leq 0.7$ (u_m – скорость газа на оси струи в некотором ее сечении; $r_{1/2}$ – радиус струи в этом сечении, определенный по половине скорости газа), частицы можно считать пассивной примесью, влияние которой на параметры турбулентности газовой фазы не зависит от диаметра частиц, а определяется только их объемной концентрацией.

Независимо от этих исследований близкий результат был приведен в публикации автора данной статьи [17], посвященной расчету пульсационных скоростей фаз, входящих в выражения для моментов корреляции (1.9). В [17] инерционность частиц оценивалась с помощью числа Стокса $Stk = \rho_f D_f^2 u / (36\mu R_{ed})$, рассчитываемого по местному значению скорости газа u и радиусу границы струи R_{ed} . Анализ результатов расчетов показал, что пульсационные скорости частиц с большой степенью точности равны пульсационным скоростям газа при $Stk \leq 0.14$, т.е. при выполнении этого условия частицы можно считать пассивной примесью. В случае струйных (автомодельных) течений $r_{1/2} = 0.44R_{ed}$. Если в формуле Stk_m , используемой в статьях [9, 10], заменить $r_{1/2}$ на R_{ed} и учесть различие в коэффициентах формул Stk в [17] и [9, 10], то в [9, 10] получается значение числа Стокса, равное 0.15, которое практически совпадает со значением 0.14, полученным в [17].

Значение числа Стокса имеет наибольшее значение на оси начального сечения струи, и поэтому в качестве критерия, который можно использовать для прогнозирования эффекта шнурования частиц в двухфазной струе, следует выбрать Stk_0 : при выполнении условия $Stk_0 = \rho_f D_f^2 u_{m0} / (36\mu R_0) \leq 0.14-0.15$ эффект шнурования будет отсутствовать.

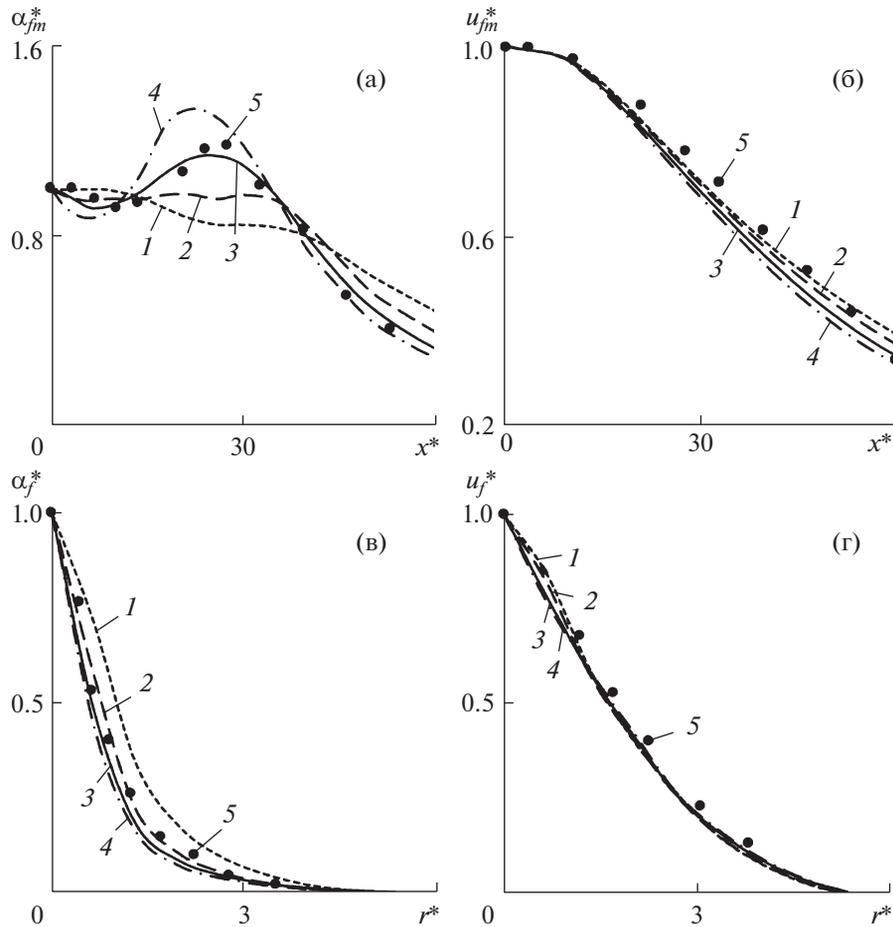


Рис. 1. Изменение параметров частиц вдоль оси и в поперечном сечении $x^* = 33$ двухфазной струи с частицами размером 23 мкм при различных поперечных скоростях частиц в ее начальном сечении: (а) – объемной концентрации частиц вдоль оси струи; (б) – продольной скорости частиц вдоль оси струи; (в) – объемной концентрации частиц в поперечном сечении струи; (г) – продольной скорости частиц в поперечном сечении струи; 1–4 – $v_f^* = 0; 0.5v_f^{*0}; v_f^{*0}; 1.5v_f^{*0}$; 5 – эксперимент [21].

Это подтверждается результатами расчетов, приведенных на рис. 3. В этом случае $Stk_0 = 0.079$. Данные расчеты выполнялись при следующих граничных условиях: на срезе сопла радиусом $R_0 = 100$ мм поля всех параметров фаз равномерные, продольные скорости газа и частиц $u_0 = u_{f0} = 200$ м/с, объемная концентрация частиц диаметром $D_f = 5$ мкм $\alpha_{f0} = 10^{-3}$, плотность газа $\rho = 1.2$ кг/м³, плотность частиц $\rho_f = 10^3$ кг/м³; во внешней среде скорости фаз $u_e = u_{fe} = 0$, объемная концентрация частиц $\alpha_e = 0$. Обозначения безразмерных величин на рис. 3 такие же, как на рис. 1.

На рис. 3а показано изменение скоростей фаз и объемной концентрации частиц вдоль оси двухфазной струи. В этом случае скорости газа и частиц совпадают, объемная концентрация частиц монотонно падает вдоль оси струи, и это изменение концентрации происходит более интенсивно по сравнению с уменьшением скоростей фаз, т.е. в случае мелких частиц их параметры изменяются вдоль оси струи так же, как параметры газовой струи, содержащей газообразную примесь. На рис. 3б изображены поперечные поля скоростей фаз и концентрации частиц в сечении струи $x^* = x/R_0 = 100$. Безразмерный поперечный профиль продольных скоростей фаз, совпадающих между собой, близок к профилю Шлихтинга, и поперечный профиль концентрации располагается выше поперечного профиля скоростей. Такая же картина наблюдается в газовых струях.

На рис. 4 показано изменение вдоль оси струи объемной концентрации частиц различного размера при $Stk_0 > 0.14-0.15$. Расчеты, результаты которых приведены на рис. 4, выполнены при двух значениях начальной объемной концентрации частиц 0.5×10^{-3} (кривые I) и 10^{-3} (II) для че-

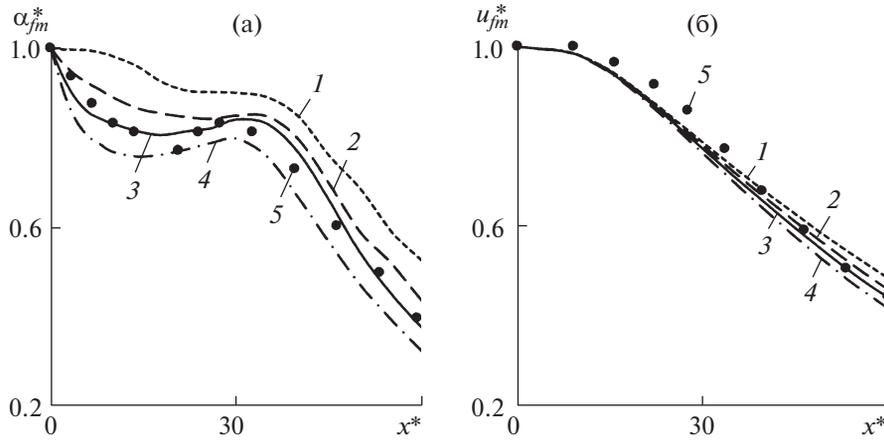


Рис. 2. Изменение параметров частиц вдоль оси двухфазной струи с частицами размером 32 мкм при различных поперечных скоростях частиц в ее начальном сечении; (а) объемная концентрация частиц; (б) продольная скорость частиц; обозначения как на рис. 1.

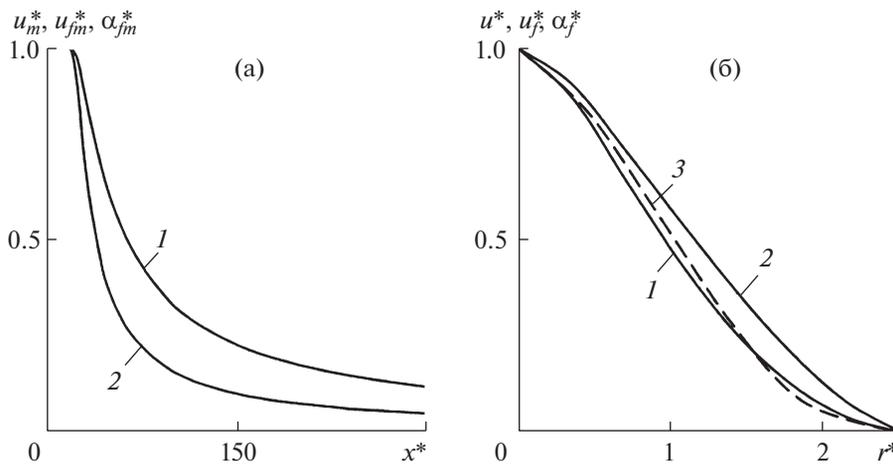


Рис. 3. Изменение параметров фаз в двухфазной струе при $Stk_0 = 0.079$: (а) – вдоль оси струи; (б) – в поперечном сечении струи; 1 – скорости газа и частиц; 2 – объемная концентрация частиц; 3 – профиль Шлихтинга.

тырех значений диаметра частиц – 5, 50, 100 и 300 мкм, что соответствует числам Стокса 0.79, 7.89, 32 и 284 (кривые 1–4). Граничные условия для остальных параметров соответствуют граничным условиям расчетов, результаты которых приведены на рис. 3. Из рис. 4 следует, что при увеличении размера частиц в случае $Stk_0 > 0.14$ –0.15 максимальное значение их объемной концентрации в струе уменьшается, и существенно возрастает длина области, в которой $\alpha_{fm} > \alpha_{fm0}$. Увеличение объемной концентрации частиц в начальном сечении двухфазной струи для частиц с $Stk_0 < 32$ приводит к росту максимального значения концентрации частиц в струе, а для более крупных частиц – к уменьшению этого значения.

Эффект шнурования можно объяснить, используя уравнение (1.2), записанное следующим образом:

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial x} = -\frac{1}{u_f} \left(\alpha_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \alpha_f v_f}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \langle \alpha_f' v_f' \rangle}{\partial r} \right) \quad (4.1)$$

В правой части этого уравнения находятся три слагаемых, имеющих на оси струи (и вблизи нее) разные знаки. Первое слагаемое в расчетах, результаты которых приведены на рис. 4, отрицательно, а второе и третье слагаемые – положительно. Изменение концентрации частиц вдоль оси струи зависит от соотношения величин слагаемых в правой части (4.1): в начале струи первое слагаемое по величине превосходит сумму второго и третьего, а в удаленной от сопла области наблюдается противополо-

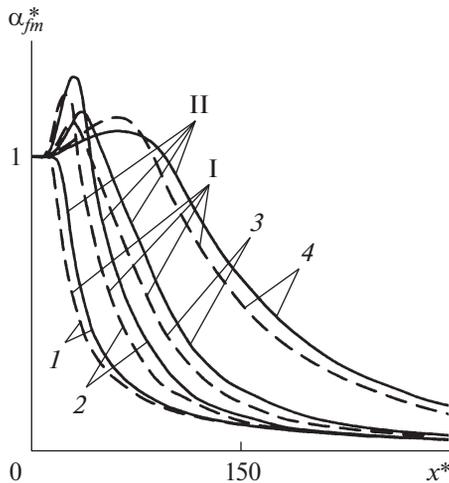


Рис 4. Зависимость объемной концентрации частиц различного размера на оси двухфазной струи от расстояния до сопла для двух значений их начальной концентрации: I, II – $\alpha_{fm0} = 0.5 \times 10^{-3}$, 10^{-3} ; I–4 – $Stk_0 = 0.79; 7.89; 32; 284$.

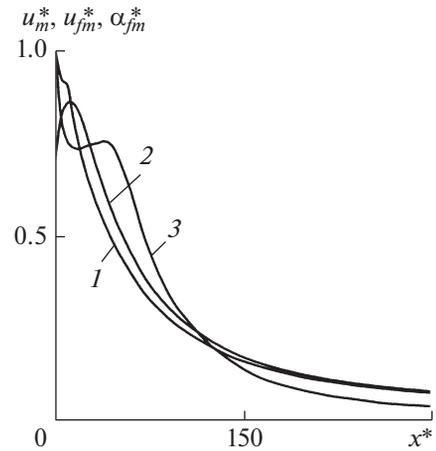


Рис. 5. Изменение параметров фаз вдоль оси двухфазной струи при начальной скорости частиц меньшей начальной скорости газа: 1 – продольная скорость газа; 2 – продольная скорость частиц; 3 – объемная концентрация частиц.

ложная картина. Поэтому (с учетом знака перед скобкой в правой части уравнения) вблизи от сопла объемная концентрация частиц увеличивается, а затем резко уменьшается.

На характер изменения объемной концентрации частиц вдоль оси двухфазной струи также оказывает влияние форма поперечных полей параметров фаз в ее начальном сечении и скольжение фаз в этом сечении. Влияние последнего иллюстрируют результаты расчетов, представленные на рис. 5.

При выполнении этих расчетов использовались такие же граничные условия, что и при выполнении расчетов, представленных на рис. 3, за исключением диаметра частиц и начального скольжения фаз. Диаметр частиц равнялся 100 мкм ($Stk_0 = 32$), скорость газа 200 м/с, скорость частиц 140 м/с (коэффициент скольжения фаз в начальном сечении струи $u_{f0}/u_0 = 0.7$). Для удобства анализа результатов расчетов безразмерная скорость частиц определялась по отношению к скорости газа: $u_{fm}^* = u_{fm}/u_{m0}$. Из рис. 5 следует, что продольная скорость газа вдоль оси струи уменьшается вследствие подмешивания газа из окружающей среды. Скорость частиц сначала возрастает, а их объемная концентрация уменьшается, достигая локального минимума, соответствующего максимуму скорости частиц. Затем скорость частиц становится больше скорости газа, и они начинают тормозиться, что приводит к их сближению и, следовательно, увеличению объемной концентрации, достигающей локального максимума примерно при $x^* = 45$. При $x^* > 45$, несмотря на торможение частиц, их объемная концентрация вдоль оси струи уменьшается. Анализ результатов расчетов показывает, что при $x^* < 45$ первое слагаемое в (4.1) по модулю превосходит сумму двух других слагаемых, и на этом участке струи изменение концентрации частиц вдоль оси струи определяется характером изменения продольной скорости частиц. При $x^* > 45$ определяющую роль начинают играть конвективный перенос частиц от оси струи и их турбулентная диффузия (второе и третье слагаемые в уравнении (4.1)), приводящие к интенсивному уменьшению концентрации частиц вдоль оси струи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведена математическая модель двухфазного турбулентного струйного течения, осредненные уравнения которой записаны для каждой фазы в переменных Эйлера. Расчеты, выполненные с использованием этой модели, показали, что при значении числа Стокса, рассчитанного по параметрам струи в ее начальном сечении, меньшем 0.14–0.15, частицы можно считать пассивной примесью, влияние которой на параметры турбулентности газовой фазы не зависит от размера частиц, а определяется только их объемной концентрацией. В этом случае скорости фаз, равные между собой, и объемная концентрация частиц изменяются вдоль оси и в поперечных сечениях струи так же, как параметры однофазной газовой струи переменного состава. При больших значениях числа Стокса в струе образуется область с объемной концентрацией частиц,

превосходящей по величине ее значение в начальном сечении струи. Размеры этой области и величина объемной концентрации частиц в ней зависят от многих факторов и, в частности, от значения числа Стокса и начальной объемной концентрации частиц. На изменение объемной концентрации частиц в двухфазной струе сильное влияние оказывает скольжение фаз в начальном сечении струи – уменьшение начальной скорости частиц по сравнению с начальной скоростью газа приводит к существенному уменьшению объемной концентрации частиц в струе. Локальное увеличение объемной концентрации частиц на оси струи объясняется противоположным влиянием на изменение этой концентрации отрицательного ускорения частиц на оси струи, приводящего к увеличению концентрации частиц, и конвективного потока массы и турбулентной диффузии частиц в поперечном направлении, вызывающих уменьшение их концентрации на оси струи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лаатс М.К., Фришман Ф.А.* О допущениях, применяемых при расчете двухфазной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 2. С. 186–191.
2. *Лаатс М.К., Фришман Ф.А.* Разработка методики и исследование интенсивности на оси двухфазной струи // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 2. С. 153–157.
3. *Навознов О.И., Павельев А.А., Мульги А.С., Лаатс М.К.* Влияние начального скольжения на рассеивание примеси в двухфазной струе // Турбулентные двухфазные течения: материалы III Всесоюзного научного совещания по теоретическим и прикладным аспектам турбулентных течений. В 2 ч. Ч. 2. Таллин: Академия наук ЭССР. 1979. С. 149–157.
4. *Картушинский А.И., Фришман Ф.А.* Исследование влияния начальных условий на развитие двухфазной турбулентной струи // Турбулентные двухфазные течения: тезисы докладов IV Всесоюзного научного совещания по теоретическим и прикладным аспектам турбулентных течений. В 2 ч. Ч. 1. Таллин: Академия наук ЭССР. 1982. С. 71–77.
5. *Лаатс М.К., Мульги А.С.* Экспериментальное исследование кинематической картины мелкодисперсного трубного течения // Турбулентные двухфазные течения: материалы III Всесоюзного научного совещания по теоретическим и прикладным аспектам турбулентных течений. В 2 ч. Ч. 2. Таллин: Академия наук ЭССР. 1979. С. 32–46.
6. *Лаатс М.К.* Трактат о движении частиц и дискретной фазы мелкодисперсного трубного течения (МДТТ): представления экспериментов // Турбулентные двухфазные течения: материалы III Всесоюзного научного совещания по теоретическим и прикладным аспектам турбулентных течений. В 2 ч. Ч. 2. Таллин: Академия наук ЭССР. 1979. С. 60–71.
7. *Картушинский А.И.* Перенос инерционной примеси в двухфазной турбулентной струе // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 1. С. 36–41.
8. *Терехов В.И., Пахомов М.А.* Влияние частиц на структуру течения и дисперсию твердой примеси в двухфазной осесимметричной струе // Журн. технической физики. 2011. Т. 81. № 10. С. 27–35.
9. *Picano F., Sardina G., Gualtieri P., Casciola C.M.* Anomalous memory effects on transport of inertial particles in turbulent jets // Physics of Fluids. 2010. V. 22. № 5. 031005. P. 1–4.
10. *Picano F., Sardina G., Gualtieri P., Casciola C.M.* Particle-laden jets: Particle distribution and back-reaction on the flow // J. Physics: Conf. Ser. 2011. V. 318. Section 5. 052018.
11. *Волков Э.П., Зайчик Л.И., Першуков В.А.* Моделирование горения твердого топлива. М.: Наука, 1994. 320 с.
12. *Elghobashi S.* Particle-laden turbulent flows: direct simulation and closure models // Applied Scientific Research. 1991. V. 48. P. 301–314.
13. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. В 2 ч. Ч. 1. М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1987. 464 с.
14. *Хинце И.О.* Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Физматгиз, 1963. 680 с.
15. *Стернин Л.Е., Шрайбер А.А.* Многофазные течения газа с частицами. М.: Машиностроение, 1994. 320 с.
16. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников, А.Н. Секундов, И.П. Смирнова / Под ред. Г.Н. Абрамовича. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1984. 716 с.
17. *Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Истомин 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.
18. Handbook of Turbulence. Fundamentals and Applications / Ed. by *W. Frost, T.H. Moulden*. New York and London: Plenum Press, 1977. 535 p. Русск. пер.: Турбулентность. Принципы и применения / Под ред. *У. Фроста, Т. Моулдена*. М.: Мир, 1980. 535 с.
19. *Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А.* Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 288 с.
20. *Шрайбер А.А., Гавин Л.Б., Наумов В.А., Яценко В.П.* Турбулентные течения газозвеси. Киев: Наук. думка, 1987. 240 с.
21. *Картушинский А.И., Фришман Ф.А.* О миграционном переносе в двухфазной струе // Струйные течения жидкостей и газов: Тез. Всесоюзной науч. конф. В 3 ч. Ч. 3. Новополюк: Новополюцкий политех. ин-т, 1982. С. 22–28.