



Научная статья

УДК 532.529.2:532.529.5

Влияние степени подогрева газокапельной турбулентной струи на ее параметры

Ю. В. Зуев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Россия, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

Зуев Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры теории воздушно-реактивных двигателей, yuri_zuev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2091-0912>, SPIN: 4501-1347, AuthorID: 231856

Аннотация. В статье изучается влияние степени подогрева газокапельной струи с фазовыми переходами и соударениями капель на параметры этой струи. Под степенью подогрева струи понимается отношение температур газа на срезе сопла и в окружающей среде. Методом исследования является математическое моделирование. Расчеты проводятся с помощью нашей ранее опубликованной математической модели двухфазной струи, полученной в рамках RANS-подхода. В этой модели осредненные уравнения газовой фазы и капель записываются в переменных Эйлера. В связи с тем, что струйные течения являются автомодельными, для расчета моментов корреляции пульсационных параметров фаз используются алгебраические формулы. При математическом моделировании рассматривается газокапельная затопленная струя, истекающая в газовую среду с температурой, существенно отличающейся от температуры газа на срезе сопла. Анализ результатов проведенных расчетов показал, что при истечении нагретой двухфазной струи в газовую среду с меньшей температурой численное значение степени подогрева струи не оказывает заметного влияния на все параметры струи. В случае истечения двухфазной струи в газовую среду с большей температурой по сравнению с температурой газа на срезе сопла величина степени подогрева струи существенным образом влияет на температуры фаз, объемные концентрации и размеры капель, а также на интенсивность фазовых переходов. В этом случае уменьшение степени подогрева струи приводит к существенному увеличению температуры газа, интенсивности фазовых переходов, более резкому уменьшению вдоль оси струи массового расхода и диаметров капель, а также к увеличению их объемных концентраций на участке струи вблизи среза сопла.

Ключевые слова: двухфазная струя, газ, капли, фазовые переходы, коагуляция и дробление капель, математическое моделирование, результаты расчетов

Для цитирования: *Зуев Ю. В.* Влияние степени подогрева газокапельной турбулентной струи на ее параметры // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 225–235. DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2026-26-2-225-235>, EDN: MQCRIY

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Influence of gas-droplet turbulent jet heating degree on its parameters

Yu. V. Zuev

Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoe shosse, Moscow 125993, Russia

Yuri V. Zuev, yuri_zuev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2091-0912>, SPIN: 4501-1347, AuthorID: 231856



Abstract. The article is devoted to the study of the influence of the heating degree of the gas-droplet jet with phase transitions and droplet collisions on the parameters of this jet. By the heating degree of the jet is meant the ratio of gas temperatures at the nozzle edge and in the environment. The research method is mathematical modeling. Calculations are carried out using our previously published mathematical model of a two-phase jet obtained as part of the RANS approach. In this model, the averaged equations of gas phase and droplets are written in Euler variables. Due to the fact that jet currents are self-similar, algebraic formulas are used to calculate the moments of correlation of pulsation phase parameters. Mathematical modeling considers a gas-droplet submerged jet flowing into a gas medium with a temperature significantly different from the gas temperature in the outlet section of the nozzle. The analysis of the results of the calculations showed that when the heated two-phase jet expires into a gas medium with a lower temperature, the numerical value of the heating degree of the jet does not significantly affect all the parameters of the jet. If a two-phase jet flows into a gas medium with a higher temperature than the gas temperature in the outlet section of the nozzle, the heating degree of the jet significantly affects the phase temperatures, volume concentrations and droplet sizes, as well as the intensity of phase transitions. In this case reduction of the heating degree of the jet leads to significant increase in temperature of gas, intensity of phase transitions, sharper reduction along an axis of a jet of mass flow and diameters of drops and also to increase in their volume concentrations on the site of a jet near an outlet section of the nozzle.

Keywords: two-phase jet, gas, drops, phase transitions, droplet coagulation and fragmentation, mathematical modeling, calculation results

For citation: Zuev Yu. V. Influence of gas-droplet turbulent jet heating degree on its parameters. *Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 225–235 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2026-26-2-225-235>, EDN: MQCRIY

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Двухфазные турбулентные струйные течения находят широкое применение в различных областях техники. Во многих случаях непрерывной фазой таких течений является газ, а дискретной фазой — капли жидкости. При математическом моделировании газокапельных струй, наряду с различием в скорости и температуре фаз, полидисперсностью капель и межфазным теплообменом, необходимо учитывать фазовые превращения и столкновения капель, которые заканчиваются их коагуляцией или дроблением. Предложенные за последние тридцать лет математические модели газожидкостных струй имеют существенные ограничения по их использованию, связанные с допущениями при выводе уравнений этих моделей. Это можно проиллюстрировать на примере статей [1–5], характерных для времени их опубликования.

Модели [1,2] разработаны для газовых струй с каплями фреона, в которых температура капель близка к температуре газовой фазы. Поэтому в них отсутствует уравнение энергии капель, которое заменяется равенством температуры капель температуре газа. Результаты расчетов по моделям [4,5] сравниваются с данными экспериментального исследования струи с каплями ацетона, температура которых отличается всего на 20 К от температуры газовой фазы. Это не позволяет предсказать поведение этих моделей при существенно большем различии в температурах фаз. Во всех отмеченных моделях учитывается только испарение жидкой фазы, но в случае полидисперсного течения, наряду с испарением мелких капель, на крупных каплях возможна конденсация пара в результате различия температур этих капель. Вследствие того, что в математических моделях [1–5] не учитываются столкновения капель, приводящие к их коагуляции или дроблению, эти модели, как отмечают их авторы, могут быть использованы только при объемной концентрации капель, не превышающей 10^{-4} . На практике концентрация капель в газокапельных струях существенно превосходит эту величину.

Информация о проведении другими авторами математического моделирования газока-



пельных струй с одновременно протекающими в них фазовыми переходами, коагуляцией и дроблением капель в настоящее время в литературе отсутствует. Об этом свидетельствуют обзорные статьи [6, 7].

Математическая модель газок капельной струи с фазовыми переходами и соударениями капель, приводящими к их коагуляции или дроблению, описана в нашей статье [8]. В этой работе моделировалась газок капельная струя с каплями воды, истекающая в неподвижную воздушную среду с температурой, существенно превышающей температуру газа на срезе сопла (в начальном сечении струи). Результаты расчетов позволили выявить степень влияния фазовых переходов и соударений капель на все осредненные параметры струи в зависимости от величины объемной концентрации капель на срезе сопла. В статье делается предположение о том, что при истечении двухфазной струи в газовую среду с температурой, меньшей температуры газа на срезе сопла, влияние фазовых переходов и соударений капель на параметры струи будет существенно отличаться от описанного в [8].

Ниже приводится математическая модель газок капельной струи с учетом фазовых переходов и соударений капель, и сравниваются результаты расчетов этой струи с различными граничными условиями по температуре газовой фазы на срезе сопла и в окружающей среде.

1. Математическая модель газок капельной струи с фазовыми переходами и столкновениями капель

При проведении расчетов газок капельной турбулентной струи использовалась математическая модель, приведенная в нашей статье [8]. В этой модели уравнения, описывающие движение газа и капель, записаны в переменных Эйлера с использованием RANS-подхода. Эти уравнения получены в результате осреднения по пространству [9] и времени [10] мгновенных уравнений Навье – Стокса с последующей оценкой порядка их членов [10].

В окончательном виде осредненные уравнения фаз турбулентной круглой стационарной неизотермической газок капельной струи в приближении пограничного слоя в цилиндрической системе координат записываются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} u \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \sum_{k=1}^K (v \rho_k \alpha_k + \alpha_k \langle \rho'_k v' \rangle + \rho_k \langle \alpha'_k v' \rangle) = - \sum_{f=1}^F M_{f,ph}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho_f \alpha_f u_f + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) = M_{f,ph} + M_{f,c}, \quad (2)$$

$$u \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) \frac{\partial u}{\partial x} + \sum_{k=1}^K (v \rho_k \alpha_k + \alpha_k \langle \rho'_k v' \rangle + \rho_k \langle \alpha'_k v' \rangle) \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \langle u' v' \rangle \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) - \sum_{f=1}^F F_{cf,x} - \sum_{f=1}^F M_{f,ph} (u_{ph} - u), \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

$$\rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial u_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial u_f}{\partial y} = - \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \rho_f \alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle + F_{cf,x} + M_{f,ph} (u_{ph} - u_f) + \sum_{f=1}^F M_{fj,c} (u_j - u_f), \quad (5)$$

$$\rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + 2 \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial v_f}{\partial y} = - \frac{\partial}{\partial x} \rho_f (\alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle + u_f \langle \alpha'_f v'_f \rangle) - \frac{v_f}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \rho_f \langle \alpha'_f v'_f \rangle - \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \rho_f \alpha_f \langle v_f'^2 \rangle + F_{cf,y} + M_{f,ph} (v_{ph} - v_f) + \sum_{f=1}^F M_{fj,c} (v_j - v_f), \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 & u \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) \frac{\partial c_p T}{\partial x} + \sum_{k=1}^K (v \rho_k \alpha_k + \alpha_k \langle \rho'_k v' \rangle + \rho_k \langle \alpha'_k v' \rangle) \frac{\partial c_p T}{\partial y} = u \frac{\partial p}{\partial x} - \\
 & - \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \langle T' v' \rangle \sum_{k=1}^K (c_{pk} \rho_k \alpha_k) - \langle u' v' \rangle \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) \frac{\partial u}{\partial y} - \sum_{f=1}^F F_{cf,x} (u_f - u) - \\
 & - \sum_{f=1}^F M_{f,ph} \left[i_{ph} - i_v(T) + \frac{(u_{ph} - u)^2}{2} \right] - \sum_{f=1}^F Q_{f,conv}, \tag{7}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \rho_f \alpha_f u_f \frac{\partial c_f T_f}{\partial x} + \rho_f (\alpha_f v_f + \langle \alpha'_f v'_f \rangle) \frac{\partial c_f T_f}{\partial y} = - \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y c_f \rho_f \alpha_f \langle T'_f v'_f \rangle - \\
 & - \rho_f \alpha_f \langle u'_f v'_f \rangle \frac{\partial u_f}{\partial y} + M_{f,ph} \left[i_{ph} - i_f(T_f) + \frac{(u_{ph} - u_f)^2}{2} \right] + \\
 & + \sum_{f=1}^F M_{fj,c} \left[i_f(T_f) - i_j(T_j) + \frac{(u_j - u_f)^2}{2} \right] + Q_{f,conv}, \tag{8}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & u \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) \frac{\partial \alpha_i}{\partial x} + \sum_{k=1}^K (v \rho_k \alpha_k + \alpha_k \langle \rho'_k v' \rangle + \rho_k \langle \alpha'_k v' \rangle) \frac{\partial \alpha_i}{\partial y} = \\
 & = - \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} y \langle \alpha'_i v' \rangle \sum_{k=1}^K (\rho_k \alpha_k) - \sum_{f=1}^F M_{f,ph}, \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$\frac{dD_f^3}{dx} = \frac{D_f^3}{\alpha_f \rho_f u_f} M_{f,ph} + \frac{6}{\pi u_f} + \sum_{j=1}^f K_{fj} e_{fj} \Phi_{fj} \alpha_j, \tag{10}$$

$$p = \rho_k R_k T, \quad \rho_f = \text{const}, \tag{11}$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k + \sum_{f=1}^F \alpha_f = 1. \tag{12}$$

В этой системе уравнений: (1) и (2) — уравнения массы фаз; (3) и (4) — проекции уравнения движения газовой фазы на оси x и y ; (5) и (6) — проекции уравнения движения капель фракции f на оси x и y ; (7) и (8) — уравнения энергии фаз; (9) — уравнение концентрации компонентов газовой фазы; (10) — уравнение, описывающее изменение диаметров капель за счет фазовых переходов, коагуляции и дробления капель; (11) — уравнения состояния газовой фазы и капель; (12) — уравнение, связывающее объемные концентрации компонентов газовой фазы и фракций капель.

В данной работе для капель используется модель дискретных частиц, в соответствии с которой капли объединяются в F фракций, параметры которых обозначаются индексом f ($f = 1, 2, \dots, F$). Параметры компонентов газовой фазы обозначаются индексом k ($k = 1, 2, \dots, K$); параметры газовой фазы, общие для всех ее компонентов (скорость, температура, давление), индексов не имеют; пульсационные параметры фаз обозначаются штрихами, а их моменты корреляции заключены в скобки вида $\langle \cdot \rangle$.

При записи уравнений (1)–(12) введены следующие обозначения: x и y — оси цилиндрической системы координат; u и v — проекции вектора скорости \mathbf{W} на оси координат x и y ; ρ — физическая плотность; α — объемная концентрация; p — давление; T — температура; D_f — диаметр капель фракции f ; R — удельная газовая постоянная; c_p — удельная теплоемкость газовой фазы при постоянном давлении; c_f — удельная теплоемкость вещества капель; $F_{cf,x}$ и $F_{cf,y}$ — проекции вектора силы сопротивления капель \mathbf{F}_{cf} на оси x и y [11]; $Q_{f,conv}$ — удельный (приходящийся на единицу объема среды) конвективный тепловой поток от газа к каплям фракции f [11]; $M_{f,pf}$ — интенсивность фазовых переходов (масса вещества капель фракции f , претерпевающая фазовый переход в единице объема среды за единицу време-



ни); $M_{f,c}$ — изменение массы капель фракции f за счет их столкновений с каплями других фракций в единице объема среды за единицу времени; $M_{fj,c}$ — масса капель, перешедшая из фракции f во фракцию j за счет столкновений капель этих фракций в единице объема среды за единицу времени; $i_f(T_f)$ и $i_j(T_j)$ — удельные энтальпии вещества капель фракций f и j при температурах T_f и T_j ; $i_v(T)$ — удельная энтальпия пара вещества капель при температуре газовой фазы T ; u_{ph} и v_{ph} — проекции вектора скорости фазового перехода \mathbf{W}_{ph} на оси x и y ; i_{ph} — удельная энтальпия вещества капель, претерпевающего фазовый переход; K_{fj} , e_{fj} , Φ_{fj} — константа коагуляции, коэффициент захвата и коэффициент эффективности соударений капель фракций f и j [12]. При испарении капель $\mathbf{W}_{ph} = \mathbf{W}_f$; $i_{ph} = i_v(T_f)$, а при конденсации пара $\mathbf{W}_{ph} = \mathbf{W}$; $i_{ph} = i_v[T_{vs}(p_v)]$ [9] ($i_v(T_f)$ — удельная энтальпия пара вещества капель при температуре T_f ; $i_v[T_{vs}(p_v)]$ — удельная энтальпия пара вещества капель на линии насыщения при парциальном давлении пара p_v в газовой смеси).

В связи с тем, что объемная концентрация пара в газовой фазе при проведении расчетов, результаты которых приводятся ниже, была существенно меньше 0.2, для интенсивности фазовых переходов используется формула [13]

$$M_{f,ph} = \frac{6\alpha_f D_\alpha \text{Sh}}{D_f^2} (\rho_{vp} - \rho_{vs}),$$

в которой ρ_{vp} — плотность пара, определяемая по его парциальному давлению в газовой фазе; ρ_{vs} — плотность пара, соответствующая давлению насыщения вещества капель при температуре капли T_f ; D_α — коэффициент диффузии пара в газовой смеси; Sh — критерий Шервуда.

Оценка порядка членов уравнений системы (1)–(12), проведенная при их выводе, показала, что расчет коагуляции и дробления капель в двухфазной струе можно проводить в одномерной постановке, пренебрегая пульсационными скоростями капель по сравнению с их осредненными скоростями, что согласуется с выводами монографии [14]. Поэтому в данной работе используется квазиодномерная модель столкновений разделенных на фракции капель за счет различия в их осредненных продольных скоростях, описанная в [12]. В этой монографии, в частности, приведены формулы для расчета членов уравнений (2), (5), (6) и (8), учитывающих изменение массы, количества движения и энергии капель фракции f в результате их взаимодействия с каплями других фракций.

Вследствие того, что двухфазные струйные течения являются автомодельными, моменты корреляции пульсационных параметров фаз, входящие в уравнения системы (1)–(12), рассчитываются с использованием алгебраических выражений [8].

Метод расчета двухфазной струи, математическая модель которой аналогична приведенной выше, изложен в монографии [15]. Валидация математической модели (1)–(12), выполненная в [8] с использованием данных экспериментального исследования воздушной струи с каплями керосина, истекающей в спутный воздушный поток с температурой 450 К [16], показала хорошее совпадение результатов расчетов с данными эксперимента.

2. Результаты расчетов

Расчеты двухфазной неизотермической турбулентной струи, выполненные с использованием приведенной выше математической модели, позволили выявить влияние граничных условий по температуре газовой фазы на параметры струи. В теории однофазных струй вводится параметр, который называется степенью подогрева струи. Он представляет собой отношение температуры газа на оси начального сечения струи и на ее границе. В данной работе этот параметр используется для газовой фазы струи: $\theta = T_{0m}/T_e$ (T_{0m} — температура газовой фазы на оси начального сечения струи; T_e — температура газа на границе струи). Ниже сравниваются результаты расчетов, в которых значения параметра θ были меньше или больше 1: $T_{0m} = 300$ К, $T_e = 400$ К ($\theta = 0.75$); $T_{0m} = 300$ К, $T_e = 500$ К ($\theta = 0.60$); $T_{0m} = 400$ К, $T_e = 300$ К ($\theta = 1.33$); $T_{0m} = 500$ К, $T_e = 300$ К ($\theta = 1.67$).

Предполагалось, что дисперсионной фазой струйного двухфазного течения является смесь водяного пара (компонент $k = 1$) с воздухом (компонент $k = 2$), а дисперсной фазой – капли воды, объединенные в пять фракций [12] с характерными диаметрами 15, 45, 75, 105 и 135 мкм. При проведении расчетов принималось, что струя истекает из круглого сопла радиусом $R_0 = 25 \cdot 10^{-3}$ м в неподвижную воздушную среду с давлением $p = 10^5$ Па и относительной влажностью 65%, которой соответствует объемная концентрация водяного пара $\alpha_{k=1} = 0.024$. Считалось, что в начальном сечении струи поперечные поля всех параметров равномерные; скорость газа $u_0 = 100$ м/с; скорость капель всех фракций $u_{f0} = 80$ м/с; температура капель всех фракций $T_{f0} = 300$ К; объемная концентрация водяного пара $\alpha_{k=1} = 0.033$ (соответствует относительной влажности воздуха 90%); суммарная объемная концентрация капель $\alpha_{f\Sigma 0} = \sum \alpha_{f0} = 10^{-3}$ с распределением этой концентрации по фракциям в пропорции 1:2:4:2:1.

Влияние степени подогрева двухфазной струи, определенной по температуре газовой фазы, на параметры фаз этой струи можно проследить по графикам на рис. 1–3. На этих рисунках зависимости параметров фаз на оси струи от продольной координаты x представлены в безразмерном виде. При этом введены следующие обозначения: $\bar{x} = x/R^*$; $\bar{u}_m = u_m/u^*$; $\bar{u}_{fm} = u_{fm}/u^*$; $\bar{u}_{f\Sigma m} = u_{f\Sigma m}/u^*$; $\bar{T}_m = T_m/T^*$; $\bar{T}_{fm} = T_{fm}/T^*$; $\bar{\alpha}_{fm} = \alpha_{fm}/\alpha^*$; $\bar{D}_{fm} = D_{fm}/D_f^*$; $\bar{M}_{f,ph} = M_{f,ph}/(D_\alpha^* \rho^*/D_f^{*2})$, в которых индексом m обозначены параметры фаз на оси струи. Масштабы соответствующих величин имеют значения: $R^* = 25 \cdot 10^{-3}$ м; $u^* = 100$ м/с; $T^* = 288$ К; $D_f^* = 100 \cdot 10^{-6}$ м; $\alpha^* = \alpha_{f\Sigma 0} = 10^{-3}$; ρ^* и D_α^* – плотность водяного пара и его коэффициент диффузии в воздухе при нормальных условиях. Среднемассовая скорость капель рассчитывается по формуле: $u_{f\Sigma} = \sum \alpha_f u_f^2 / \sum \alpha_f u_f$.

О влиянии степени подогрева струи на скорости фаз можно судить по результатам расчетов, представленным на рис. 1.

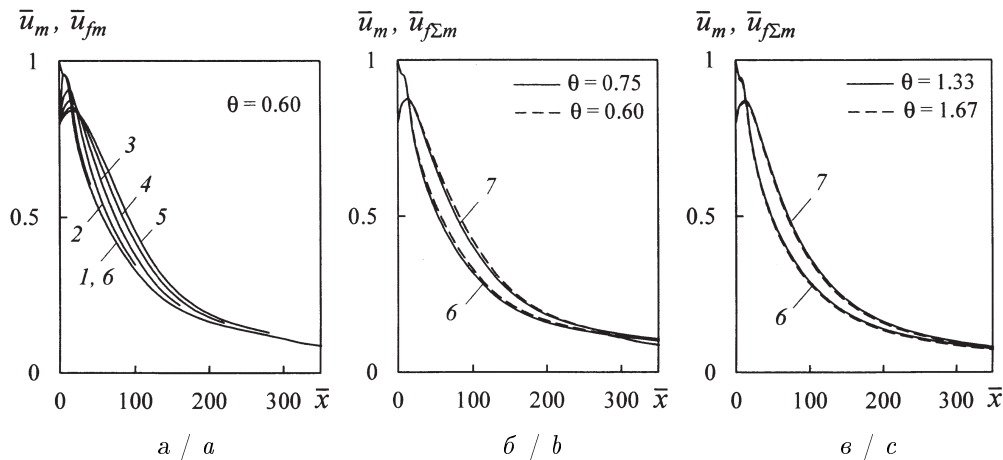


Рис. 1. Изменение скорости газа и скорости капель вдоль оси двухфазной струи при различных значениях степени подогрева этой струи θ : а – скорость газа и скорости пяти фракций при $\theta = 0.60$; б – скорость газа и среднемассовая скорость капель при $\theta < 1$; в – скорость газа и среднемассовая скорость капель при $\theta > 1$. Кривые 1–5 – скорости капель фракций $f = 1-5$; 6 – скорость газа; 7 – среднемассовая скорость капель

Fig. 1. Change in the gas velocity and droplet velocities along the axis of the two-phase jet at different values of the heating degree of this jet θ : a is the velocities of gas and droplets of five fractions at $\theta = 0.60$; b is the gas velocity and average mass velocity of drops at $\theta < 1$; c is the gas velocity and average mass velocity of drops at $\theta > 1$. Curves 1–5 are droplet velocities of fractions $f = 1-5$; 6 is the gas velocity; 7 is the average mass velocity of drops

На рис. 1, а приведены графики изменения вдоль оси струи скорости газа и капель пяти выделенных фракций для случая $\theta = 0.60$, при котором струя истекает в окружающую



среду с существенно бóльшей температурой по сравнению с температурой фаз на срезе сопла. Скорость газа при удалении от сопла уменьшается за счет подмешивания к струе газа из окружающей среды. При этом скорость капель возрастает, достигает скорости газа, а затем уменьшается, оставаясь больше скорости газа. Причем чем больше размер капель, тем в большей степени их скорости отличается от скорости газа. Это объясняется увеличением инерционности капель с ростом их диаметра. Зависимости $\bar{u}_m = \bar{u}_m(\bar{x})$ и $\bar{u}_{fm} = \bar{u}_{fm}(\bar{x})$ для других значений параметра θ аналогичны зависимостям, представленным на рис. 1, а для $\theta = 0.60$.

На рис. 1, б приведены графики изменения вдоль оси струи скорости газа \bar{u}_m и среднемассовой скорости капель $\bar{u}_{f\Sigma m}$ при $\theta < 1$, а на рис. 1, в — эти же графики при $\theta > 1$. Из данных рис. 1 следует, что изменение степени подогрева двухфазной струи с фазовыми переходами и соударениями капель в диапазоне $0.60 < \theta < 1.67$ практически не влияет на ее кинематические параметры.

На рис. 2 представлены зависимости изменения вдоль оси струи других ее параметров для степени подогрева $\theta < 1$.

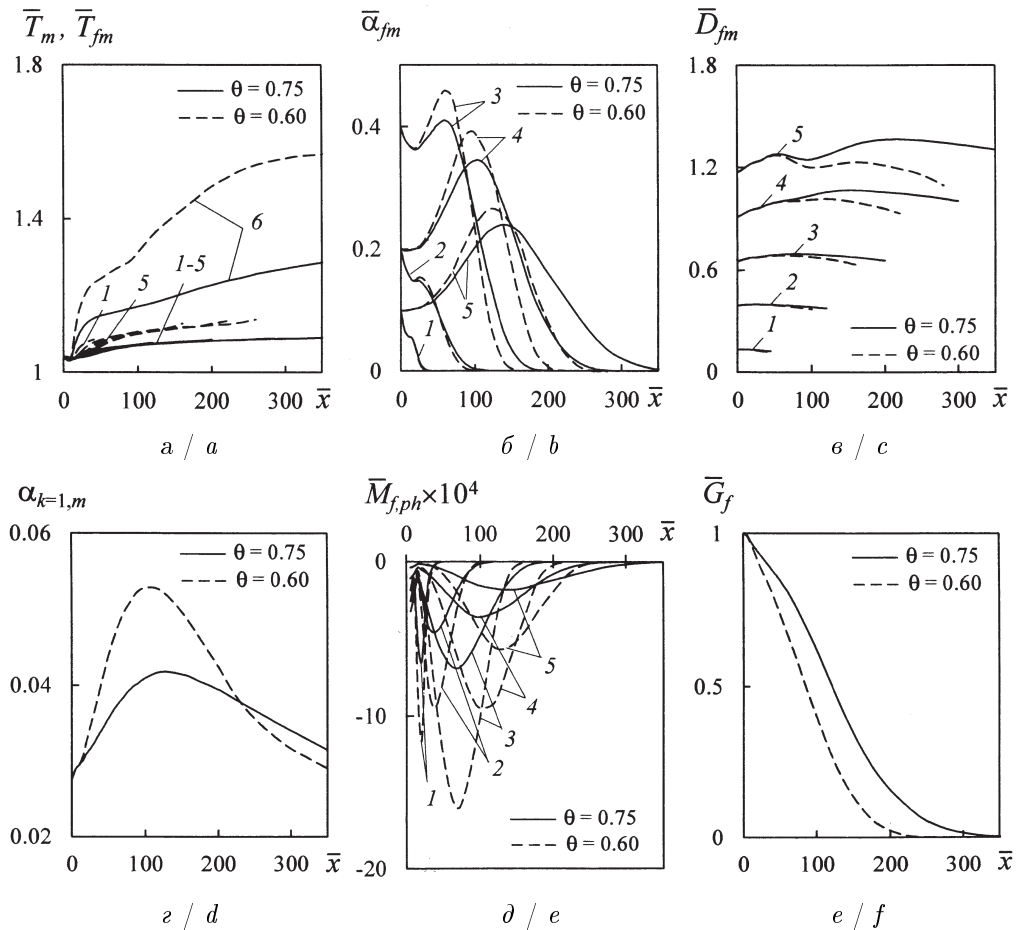


Рис. 2. Графики изменений значений параметров вдоль оси двухфазной струи при степени подогрева струи $\theta < 1$: а — температура фаз; б — объемная концентрация капель; в — диаметр капель; г — объемная концентрация пара в газовой смеси; д — интенсивность фазовых переходов; е — массовый расход капель. Номера кривых соответствуют номерам фракций

Fig. 2. Graphs of parameter changes along the axis of the two-phase jet, when the jet heating degree is $\theta < 1$: а are the phases temperatures; б are the volume concentrations of droplets; в are the diameters of droplets; г is the volume concentration of steam in the gas mixture; д is the intensity of phase transitions; е is the mass flow velocity of droplets. Curve numbers correspond to fraction numbers

В этом случае при удалении от сопла температура газа на оси струи возрастает (рис. 2, а), причем при подогреве $\theta = 0.60$ величина этой температуры примерно в два раза больше по сравнению с подогревом $\theta = 0.75$. Температура капель заметно увеличивается на участке струи $\bar{x} < 100$, при этом ее значения обратно пропорциональны размеру капель. При больших значениях \bar{x} рост температуры капель замедляется и температура капель всех фракций примерно одинакова. На определенных расстояниях от сопла, зависящих от размеров капель, капли исчезают, полностью испаряясь. Увеличение значения параметра θ приводит к уменьшению температуры газа и капель вследствие поступления в струю из окружающей среды газа с меньшей температурой.

На рис. 2, б представлены графики изменения объемных концентраций капель пяти фракций вдоль оси струи, построенные для двух значений степени подогрева этой струи. Зависимости $\bar{\alpha}_{fm} = \bar{\alpha}_{fm}(\bar{x})$ для капель фракций $f = 2-5$, в отличие от однофазных струй, являются немонокотными: на некоторых расстояниях от начального сечения струи, зависящих от размера капель, происходит увеличение их концентрации. Этот эффект, который в литературе называется «шнурованием», подробно рассмотрен в статье [17]. При уменьшении параметра θ (увеличении температуры окружающей среды) максимальные значения концентраций капель фракций $f = 3-5$ существенно возрастают (до 15%).

Графики на рис. 2, в позволяют выявить влияние степени подогрева струи на размеры капель. Это влияние является существенным и выражается в уменьшении диаметра капель при уменьшении значения параметра θ (максимум на 18% для капель фракции $f = 5$).

Зависимости объемной концентрации пара в газовой смеси от координаты \bar{x} приведены на рис. 2, г. Максимальные значения этой концентрации соответствуют $\bar{x} \simeq 100$, причем при $\theta = 0.60$ максимальное значение $\bar{\alpha}_{k=1,m}$ на 30% больше по сравнению со случаем $\theta = 0.75$.

На рис. 2, д приведены графики зависимостей интенсивности фазовых переходов $\bar{M}_{f,ph} = \bar{M}_{f,ph}(\bar{x})$ для капель различного размера от степени подогрева струи. Абсолютные значения этих зависимостей имеют максимумы, величина и расположение которых зависят от размера капель. Согласно результатам расчетов, приведенным на этом рисунке, уменьшение степени подогрева струи от 0.75 до 0.60 приводит к увеличению интенсивности фазовых переходов в 1.5–2.0 раза.

На рис. 2, е изображены графики изменения вдоль оси двухфазной струи массового расхода дисперсной фазы в поперечных сечениях струи при различных значениях параметра θ . Уменьшение степени подогрева струи приводит к более резкому уменьшению вдоль ее оси массового расхода капель.

На рис. 3 показаны зависимости изменения по длине струи ее параметров при степени подогрева $\theta > 1$.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о том, что при степени подогрева двухфазной струи $\theta > 1$ величина этого подогрева практически не влияет на значения температуры фаз, объемной концентрации и диаметра капель, интенсивности фазовых переходов и массового расхода капель. И при этом в случае $\theta > 1$ существуют значительные отличия изменения этих параметров струи от случая $\theta < 1$. При истечении нагретой струи в среду с меньшей температурой на участке $\bar{x} < 50$ (рис. 3, а) происходит резкое падение температуры газа в струе вследствие подмешивания к ней более холодного газа из окружающего пространства; при $\bar{x} > 50$ температура газа на оси струи плавно уменьшается. Из-за этого температура капель вблизи сопла незначительно возрастает (максимум на 6%), а затем уменьшается, приближаясь к температуре окружающей среды. Вследствие уменьшения температуры газа в струе уменьшается интенсивность фазовых переходов и параметры струи в большей степени зависят от столкновений капель. Это приводит к возрастанию диаметра капель и замедлению убывания их массового расхода вдоль оси струи.

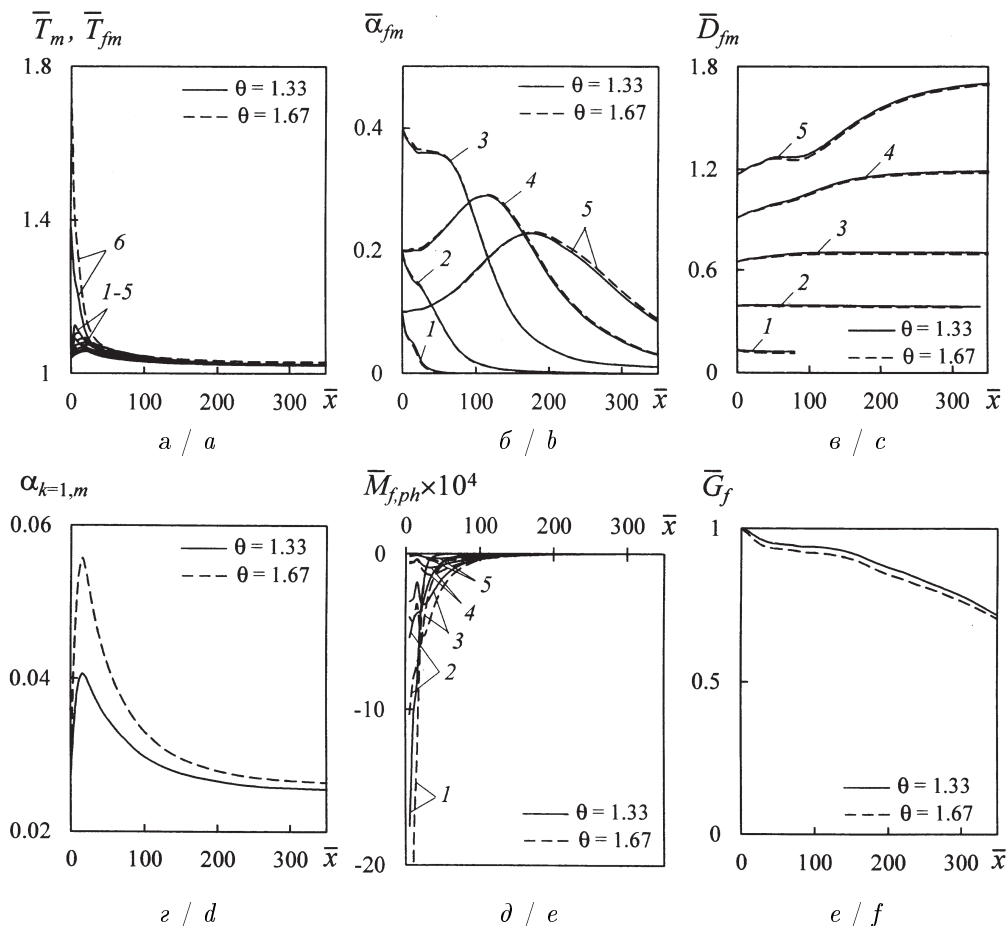


Рис. 3. Графики изменений значений параметров вдоль оси двухфазной струи при степени подогрева струи $\theta > 1$: а — температура фаз; б — объемная концентрация капель; в — диаметр капель; г — объемная концентрация пара в газовой смеси; д — интенсивность фазовых переходов; е — массовый расход капель. Номера кривых соответствуют номерам фракций

Fig. 3. Graphs of parameter changes along the axis of the two-phase jet, when the jet heating degree is $\theta > 1$: а are the phases temperatures; б are the volume concentrations of droplets; в are the diameters of droplets; г is the volume concentration of steam in the gas mixture; д is the intensity of phase transitions; е is the mass flow velocity of droplets. Curve numbers correspond to fraction numbers

Заклучение

Проведены расчеты газок капельной турбулентной неизотермической полидисперсной струи с учетом фазовых переходов, коагуляции и дробления капель, в которых изменялась степень подогрева струи θ . При этом под степенью подогрева двухфазной струи понимается отношение температуры газа на срезе сопла и в окружающей среде (на границе струи). Степень подогрева струи варьировалась в диапазоне 0.60–1.67. Анализ результатов расчетов показал, что, независимо от величины степени подогрева струи, этот подогрев не оказывает какого-либо заметного влияния на скорость газа и капель. Влияние степени подогрева струи на другие ее параметры принципиально отличается для случаев $\theta > 1$ и $\theta < 1$. При $\theta > 1$ (истечение нагретой струи в газовую среду с меньшей температурой) величина степени подогрева практически не оказывает влияния на температуру фаз, объемную концентрацию и размер капель и незначительно влияет на интенсивность фазовых переходов, которые локализованы в небольшой области, расположенной за срезом сопла. При $\theta < 1$ (истечение струи в газовую среду с температурой, превышающей температуру



газовой фазы на срезе сопла) уменьшение степени подогрева струи от 0.75 до 0.60 приводит к изменению всех параметров струи: на оси струи температура газа увеличивается (примерно в два раза); максимальные значения объемной концентрации капель фракций $f = 3-5$ возрастают (до 15%); диаметр капель этих фракций уменьшается (до 18%); интенсивность фазовых переходов возрастает (в 1.5–2.0 раза). При этом температура капель на оси струи увеличивается незначительно (до 4%) вследствие их испарения.

Список литературы

1. Mostafa A. A., Elghobashi S. E. A two-equation turbulence model for jet flows laden with vaporizing droplets // *International Journal of Multiphase Flow*. 1985. Vol. 11, iss. 4. P. 515–533. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(85\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(85)90073-4)
2. Mostafa A. A., Mongia H. C. On the modeling of turbulent evaporating sprays: Eulerian versus Lagrangian approach // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987. Vol. 30, iss. 12. P. 2583–2593. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90139-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90139-6)
3. Пахомов М. А., Терехов В. И. Численное исследование турбулентной структуры полидисперсной двухфазной струи с испаряющимися каплями // *Математическое моделирование*. 2016. Т. 28, № 11. С. 64–78. EDN: XRIPKL
4. De S., Lakshmisha K. N. Simulations of evaporating spray jet in a uniform co-flowing turbulent air stream // *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*. 2009. Vol. 1, iss. 2. P. 169–198. DOI: <https://doi.org/10.1260/175682709788707459>
5. Wang J., Dalla Barba F., Picano F. Direct numerical simulation of an evaporating turbulent diluted jet-spray at moderate Reynolds number // *International Journal of Multiphase Flow*. 2021. Vol. 137. Art. 103567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103567>
6. Вараксин А. Ю. Двухфазные потоки с твердыми частицами, каплями и пузырями: проблемы и результаты исследований (обзор) // *Теплофизика высоких температур*. 2020. Т. 58, № 4. С. 646–669. DOI: <https://doi.org/10.31857/S004036442004016X>, EDN: NBIXRZ
7. Вараксин А. Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков с твердыми частицами, каплями и пузырями // *Теплофизика высоких температур*. 2023. Т. 61, № 6. С. 926–948. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364423060169>, EDN: VCCAVW
8. Зуев Ю. В. Газокапельные турбулентные струи с фазовыми превращениями и соударениями капель // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2025. № 1. С. 146–160. DOI: <https://doi.org/10.31857/S1024708425010072>, EDN: DUXGPS
9. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред : в 2 ч. Ч. 1. Москва : Наука, 1987. 464 с.
10. Хинце И. О. Турбулентность, ее механизм и теория. Москва : Физматгиз, 1963. 680 с.
11. Стернин Л. Е., Шрайбер А. А. Многофазные течения газа с частицами. Москва : Машиностроение, 1994. 320 с.
12. Стернин Л. Е. Основы газодинамики двухфазных течений в соплах. Москва : Машиностроение, 1974. 212 с.
13. Fuchs N. A. Evaporation and droplet growth in gaseous media. London : Pergamon Press, 1959. 80 p.
14. Friedlander S. K. Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior. New York : Wiley and Sons, 1977. 317 p.
15. Шрайбер А. А., Гавин Л. Б., Наумов В. А., Яценко В. П. Турбулентные течения газовзвеси. Киев : Наукова думка, 1987. 240 с.
16. Yule A. J., Seng C. Ah., Felton P. G., Ungut A., Chigier N. A. A study of vaporizing fuel sprays by laser techniques // *Combustion and Flame*. 1982. Vol. 44, iss. 1–3. P. 71–84. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90064-5](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90064-5)
17. Зуев Ю. В. О некоторых причинах немоноготонного изменения концентрации дискретной фазы в двухфазной турбулентной струе // *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2020. № 2. С. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0568528120020152>, EDN: CGMDJX

References

1. Mostafa A. A., Elghobashi S. E. A two-equation turbulence model for jet flows laden with vaporizing droplets. *International Journal of Multiphase Flow*, 1985, vol. 11, iss. 4, pp. 515–533. DOI: [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(85\)90073-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(85)90073-4)
2. Mostafa A. A., Mongia H. C. On the modeling of turbulent evaporating sprays: Eulerian versus



- Lagrangian approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, vol. 30, iss. 12, pp. 2583–2593. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(87\)90139-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(87)90139-6)
3. Pakhomov M. A., Terekhov V. I. Numerical simulation of turbulent flow in a polydispersed two-phase jet with evaporating droplets. *Matematicheskoe modelirovanie*, 2016, vol. 28, iss. 11, pp. 64–78 (in Russian). EDN: XRIPKL
 4. De S., Lakshmisha K. N. Simulations of evaporating spray jet in a uniform co-flowing turbulent air stream. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 2009, vol. 1, iss. 2, pp. 169–198. DOI: <https://doi.org/10.1260/175682709788707459>
 5. Wang J., Dalla Barba F., Picano F. Direct numerical simulation of an evaporating turbulent diluted jet-spray at moderate Reynolds number. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, vol. 137, art. 103567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103567>
 6. Varaksin A. Yu. Two-phase flows with solid particles, droplets, and bubbles: Problems and research results (review). *High Temperature*, 2020, vol. 58, iss. 4, pp. 595–614. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X20040161>, EDN: GWMWUD
 7. Varaksin A. Yu. Hydro- and gas dynamics of two-phase flows with solid particles, droplets, and bubbles (review). *High Temperature*, 2023, vol. 61, iss. 6, pp. 852–870. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0040364423060169>
 8. Zuev Yu. V. Gas-droplet turbulent jets with phase transitions and droplet collisions. *Fluid Dynamics*, 2025, vol. 60, art. 21. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462824603437>
 9. Nigmatulin R. I. *Dynamics of multiphase media*. Vol. 1. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1990. 507 p. (Russ. ed.: Moscow, Nauka, 1987. 464 p.).
 10. Hinze J. O. *Turbulence. An introduction to its mechanism and theory*. New York, McGraw-Hill, 1959. 586 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112061230266>
 11. Sternin L. E., Shrayber A. A. *Mnogofaznye techeniya gaza s chastitsami* [Multiphase gas-particle flows]. Moscow, Mashinostroenie, 1994. 320 p. (in Russian).
 12. Sternin L. E. *Osnovy gazodinamiki dvukhfaznykh techeniy v soplakh* [Fundamentals of gas dynamics of two-phase nozzle flows]. Moscow, Mashinostroenie, 1974. 212 p. (in Russian).
 13. Fuchs N. A. *Evaporation and droplet growth in gaseous media*. London, Pergamon Press, 1959. 80 p.
 14. Friedlander S. K. *Smoke, dust and haze: Fundamentals of aerosol behavior*. New York, Wiley and Sons, 1977. 317 p.
 15. Shrayber A. A., Gavin L. B., Naumov V. A., Yatsenko V. P. *Turbulentnye techeniya gazovzvesi* [Turbulent flows of a gas suspension]. Kyiv, Naukova dumka, 1987. 240 p. (in Russian).
 16. Yule A. J., Seng C. Ah., Felton P. G., Ungut A., Chigier N. A. A study of vaporizing fuel sprays by laser techniques. *Combustion and Flame*, 1982, vol. 44, iss. 1–3, pp. 71–84. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90064-5](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90064-5)
 17. Zuev Yu. V. Some reasons for nonmonotonic variation of discrete-phase concentration in a turbulent two-phase jet. *Fluid Dynamics*, 2020, vol. 55, iss. 2, pp. 194–203. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462820020147>, EDN: WBTYZH

Поступила в редакцию / Received 19.06.2025

Принята к публикации / Accepted 18.12.2025

Опубликована / Published 01.06.2026