

УДК 536.24

## Моделирование процесса смешения газодапельной пристенной струи с нагретым турбулентным потоком в цилиндрическом канале\*

М.А. Пахомов, В.И. Терехов

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: pma41976@yandex.ru

Выполнено численное моделирование локальной структуры течения и процесса смешения при вдуве газодапельной пристенной струи в турбулентный воздушный нагретый поток. При решении используется система осесимметричных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (RANS) с учетом двухфазности течения. Для описания динамики и тепломассопереноса в дисперсной фазе применяется Эйлеров континуальный подход. Показано существенное влияние массовой концентрации жидкости на распределение параметров по сечению канала и тепловую эффективность. Рост тепловой эффективности достигает 30 % в начальной части канала и 200 % — в его концевой части в сравнении с однофазной воздушной пристенной струей.

**Ключевые слова:** численное моделирование, модель переноса Рейнольдсовых напряжений, вдув, пристенная газодапельная струя, испарение капель, турбулентность.

### Введение

Защита рабочих поверхностей энергетических машин и установок от воздействия высокотемпературных потоков газа с помощью вдува пристенных газовых струй (завес) остается актуальной и важной задачей (см. монографии [1, 2] и обобщающие обзоры [3–5]). Весьма эффективными являются гидродинамические способы защиты, когда охлаждающий газ (жидкость) под различными углами вдувается через кольцевую щель [2–4] или систему отверстий [6] в пограничный пристенный слой. Наиболее простым с конструктивной точки зрения является вдув через кольцевые тангенциальные щели [1–4]. Теория однофазных газовых завес как при относительно простых, так и сложных динамических условиях, развивающихся на не- и адиабатической поверхностях, достаточно хорошо разработана [1–3].

Вдув пристенных газодапельных струй [7–11] представляет собой один из наиболее простых и эффективных способов значительного повышения тепловой защиты стенки. Основным механизмом повышения теплозащитных свойств двухфазных газодапельных

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке мегагранта министерства науки и высшего образования (номер соглашения 075-15-2024-620).

систем включает в себя использование теплоты фазового перехода в непосредственной окрестности стенки [7, 9–11].

Моделирование смешения газокapельной струи со спутным газовым турбулентным потоком внутри канала, где учитывается взаимодействие капelь с турбулентностью несущего потока, прогрев и испарение капelь, а также диффузия водяного пара в парогазовую смесь [9–11], является сложным процессом. За последние несколько десятилетий были проведены теоретические [7], экспериментальные [7–9, 11–13] и численные [10, 13] исследования процессов смешения в таких течениях. В этих исследованиях было установлено, что даже небольшая массовая концентрация капelь жидкости (несколько процентов от массы вторичного потока) в струе приводит к изменению локальной турбулентной структуры и существенному повышению тепловой эффективности пристенной струи. Несмотря на сложность процесса турбулентного переноса и тепломассообмена в многокомпонентных системах, в настоящее время достигнут определенный прогресс в разработке методов расчета газокapельных пристенных струй [10] при их вдуве в спутный воздушный турбулентный поток. В работе [10] было показано, что для частиц диаметром  $d_2 = 2–5$  мкм тепловая эффективность практически не зависит от диаметра капelь, а определяется только их массовым содержанием. Для крупных капelь ( $d_2 > 30$  мкм) эффективность пристенной завесы снижается. В указанном исследовании использовалась система осесимметричных уравнений в приближении пограничного слоя и изотропная  $k-\varepsilon$ -модель турбулентности [14], записанная с учетом двухфазности потока [12]. Применение изотропных моделей турбулентности ограничивает возможности изучения такого сложного и многофакторного процесса, как смешение неизоtермических потоков в канале при наличии испарения мелкодисперсных капelь.

Целью настоящей работы является численное исследование процесса струйного смешения при вдуве газокapельной пристенной струи в спутный турбулентный однофазный воздушный поток вблизи адиабатической поверхности цилиндрического канала.

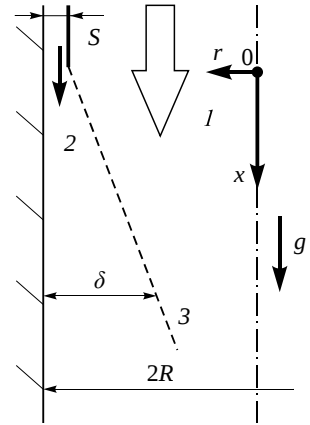
### Модель и метод численной реализации

При решении рассматриваемой задачи используются осесимметричные стационарные RANS-уравнения, записанные с учетом влияния капelь на процессы переноса в газе [15, 16]. Для описания динамики течения и тепломассопереноса в газовой и дисперсной фазах применяется эйлеров континуальный подход [13, 16]. Турбулентность несущей фазы описывается с использованием эллиптической модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений [17], записанной с учетом двухфазности потока [14]. В настоящей работе планируется получить результаты расчетов смешения и распространения пристенной газокapельной струи, развивающейся в спутном газовом нисходящем турбулентном потоке. Все численные расчеты выполняются для монодисперсной газокapельной смеси на входе в расчетную область. Далее диаметр капelь изменятся как в аксиальном, так и в радиальном направлениях.

Схематическое представление распространения двухфазной пристенной газокapельной струи показано на рис. 1. Здесь  $R$  — радиус трубы,  $S$  — высота кольцевой щели,  $\delta$  — толщина пограничного слоя смешения. Объемная концентрация капelь воды на входе мала —  $\Phi_2 = M_{L2}\rho/\rho_L < 2 \cdot 10^{-4}$  (здесь  $M_{L2}$  — начальная массовая концентрация капelь,  $\rho$  и  $\rho_L$  — плотности газа и материала капelь), капли достаточно мелкие (начальный диаметр  $d_2 = 20$  мкм). Вследствие этого дробление и коалесценция капelь в потоке

Рис. 1. Схема развития нисходящей пристенной газокapельной струи при вдуве в спутный воздушный поток (не в масштабе).

- 1 — основной однофазный турбулентный поток,  
2 — газокapельная пристенная струя,  
3 — граница слоя смешения пристенной струи с основным течением.



не принимались во внимание [10, 15]. Диаметр трубы  $2R = 100$  мм, высота кольцевой щели  $S = 5$  мм. Начало системы координат соответствовало сечению вдува двухфазного вторичного потока. Течение состояло из двух коаксиальных потоков. Стенка являлась адиабатической. Основной горячий поток с температурой  $T_1 = 323$  К подавался по центральному каналу диаметром  $2(R-S)$ . Входные распределения параметров основного газового потока задавались с использованием результатов предварительного расчета однофазного потока в трубе длиной  $150R$ . Таким образом, во входном сечении имелось полностью гидродинамически стабилизированное течение газа, а сам воздух был сухим. Через периферийную кольцевую щель высотой  $S$  вдувался газокapельный поток с температурой капель и газа  $T_{L2} = T_2 = 293$  К и с равномерным распределением всех параметров по высоте щели. Среднерасходная скорость газа (воздух) в основном потоке составляла  $U_{m2} = 10$  м/с. Средняя скорость пристенной струи воздуха  $U_2$  изменялась в диапазоне 4–15,7 м/с, а начальная скорость капель являлась постоянной по высоте щели:  $U_{L2} = 0,8U_2$ . Числа Рейнольдса основного и вторичного потоков составляли  $Re_1 = 2RU_{m1}/\nu_1 = 4,3 \cdot 10^4$  и  $Re_2 = SU_{2/\nu_2} = (1,3-5,2) \cdot 10^3$ . Параметр вдува  $m = \rho_2 U_2 / \rho_1 U_1 = 0,5-2$ . Здесь  $U$  — осредненная продольная скорость, нижние индексы 1 и 2 соответствуют параметрам течения основного и вторичного потоков. В выходном сечении задавались условия равенства нулю производных всех искомых параметров в продольном направлении. На стенках канала были заданы условия непроницаемости и прилипания для несущей фазы.

Для дисперсной фазы на адиабатической стенке трубы использовались граничные условия «поглощающей стенки» [18] — когда капля, «выпавшая» на стенку из двухфазного течения, в поток не возвращается, и в следующем расчетном сечении происходил пересчет концентрации капель. Капли воды добавлялись к однофазному воздушному вторичному течению во входном сечении. Начальные массовые концентрации капель воды  $M_{L1}$  и водяного пара  $M_{V1}$  составляли соответственно 0–0,05 и 0,005. Число Стокса для капель в осредненном движении записывалось как  $Stk = \tau/\tau_f = 0,01-0,4$ , где  $\tau = \rho_{L2} d_2^2 / \left[ 18\mu_2 \left( 1 + 0,15 Re_{L2}^{0,687} \right) \right] = 1,2$  мс — время динамической релаксации частиц,  $Re_L = |U_S - U_L|d_2/\nu_2$  — число Рейнольдса дисперсной фазы, построенное по межфазной скорости,  $U_S$  и  $U_L$  — векторы актуальной скорости газовой фазы в точке расположения частицы и капель соответственно,  $\tau_f = R/U_2 = 3,2-12,5$  мс — характерный турбулентный макромасштаб [19]. Число Стокса в пульсационном движении  $Stk_K = \tau/\tau_K = 0,2$ , где  $\tau_K = \eta_K^2/\nu_2 = 6$  мс и  $\eta_K = (\nu_2^3/\varepsilon_2)^{1/4} = 0,3$  мм — колмогоровские масштабы. Отметим, что для исследованного диапазона изменения начальных данных величина колмогоровского микромасштаба  $\tau_K$  может быть как больше, так и меньше временного турбулентного макромасштаба  $\tau_f$ .

Численное решение было получено с использованием метода конечных объемов на структурированной сетке в осесимметричной постановке. При решении использовался Эйлеров численный код, разработанный авторами данной статьи. Для конвективных слагаемых дифференциальных уравнений применялась процедура QUICK второго порядка точности. Для диффузионных потоков были использованы центральные разности второго порядка точности. Коррекция поля давления осуществлялась по конечно-объемной согласованной процедуре SIMPLER. Все расчеты проводились на базовой сетке, содержащей  $350 \times 100$  контрольных объемов. С целью проверки получения независимого решения от количества расчетных ячеек были проведены расчеты на сетках, содержащих  $200 \times 50$  («грубая») и  $550 \times 150$  («подробная») контрольных объемов.

Авторы провели сравнения с данными измерений [9] для газокapельной пристенной завесы, развивающейся на адиабатической стенке. Было получено удовлетворительное согласование с данными экспериментов по распределению тепловой эффективности по длине канала, что послужило базисом при проведении численных расчетов настоящей работы.

### Результаты численных расчетов и их анализ

Профили осредненной аксиальной скорости газовой фазы в пристенной струе при продвижении вниз по потоку показаны на рис. 2а в трех сечениях по длине цилиндрического канала при значениях параметров вдува  $m$ , равных 0,5, 1 и 2. Были исследованы случаи для значений параметров вдува  $m < 1$ , когда преобладающую роль в процессе развития пристенной струи играют закономерности пристенной турбулентности, и для  $m > 1$ , когда преобладают законы струйного смешения. В пристенной области цилиндрического канала наблюдалось течение, поведение которого демонстрировало закономерности, присущие однофазному потоку [1]. При больших параметрах вдува ( $m = 2$ ) в пристенной области развивалась струя со скоростью, превосходящей свое значение в основном потоке, процесс восстановления течения до развитого турбулентного в трубе происходил на значительно больших расстояниях от среза щели, чем при  $m = 0,5$ .

Закономерности тепломассопереноса, возникающие в пристенных газокapельных струях, могут быть проанализированы с использованием локальных распределений

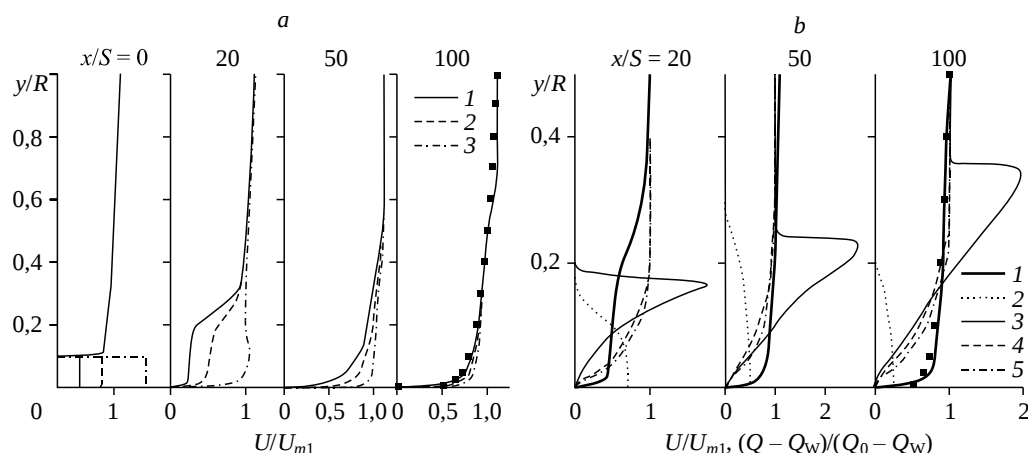
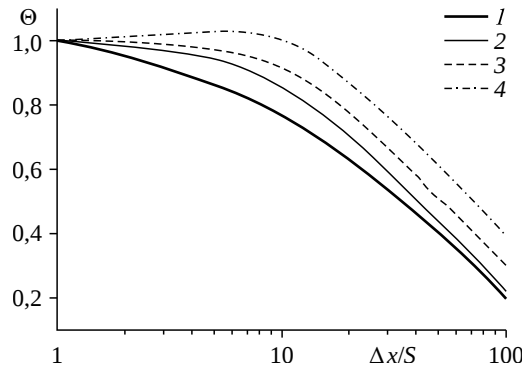


Рис. 2. Профили осредненной аксиальной скорости при вариации параметра вдува (а) и параметров газовой фазы (б) по длине канала в газокapельной пристенной завесе.

$M_{L2} = 0,05$ ; символы — расчет  $U/U_0 = (y/R)^{1/7}$  [1, 2];

а:  $m = 0,5$  (1), 1 (2), 2 (3); б: 1 —  $U/U_{m1}$ , 2 —  $M_L$ , 3 —  $M_V$ , 4 —  $T$ , 5 —  $T_L$ .

Рис. 3. Профили тепловой эффективности в газокapельной пристенной завесе при  $m = 1$ .  
 $M_{L1} = 0$  (1), 0,01 (2), 0,02 (3), 0,05 (4).



термогазодинамических параметров по толщине пограничного слоя. Профили осредненной аксиальной скорости ( $U$ ), массовой концентрации дисперсной фазы ( $M_L$ ) и водяного пара ( $M_V$ ), температур газовой ( $T$ ) и дисперсной ( $T_L$ ) фаз приведены на рис. 2b при  $m = 1$ . Все профили представлены в относительном виде:  $(Q - Q_W)/(Q_0 - Q_W) = f(y/R)$ , где  $Q$ ,  $Q_W$ ,  $Q_0$  — значения параметров в рассматриваемой точке, на стенке канала и на оси цилиндрического канала соответственно. Как видно из данных рис. 2b, подобия в распределении параметров по толщине пограничного слоя не наблюдается. Это объясняется тем, что уравнения энергии и диффузии для обтекания адиабатической стенки являются неподобными [1, 2]. Наличие фазовых превращений, обусловленных испарением капель, приводит к усилению неподобия, что особенно сильно сказывается на распределении концентрации водяного пара. Профиль массовой концентрации пара имеет ярко выраженный максимум — фронт испарения [10, 11], расположенный у внешней границы пристенной струи.

Тепловая эффективность пристенной завесы — важнейший безразмерный параметр для оценки тепловой защиты стенки канала. Он определяется по формуле [1–3]

$$\Theta = (T_1 - T_W)/(T_1 - T_2),$$

где  $T_W$  — температура адиабатной стенки. Данные по влиянию начальной массовой концентрации капель  $M_{L2}$  на изменение величины тепловой эффективности пристенной завесы по продольной координате показаны на рис. 3. Добавление испаряющихся капель вызывает существенное улучшение эффективности тепловой завесы. Рост тепловой эффективности при  $M_{L2} = 0,05$  достигает 30 % в начальной части канала при  $\Delta x/S = 10$  и 200 % — при  $\Delta x/S = 100$  в сравнении с однофазным потоком охладителя. Здесь  $\Delta x = x - x_0$  и  $x_0 \approx 6$  — длина начального участка ( $\Theta = 1$  [1, 2]) для однофазной завесы при  $m = 1$ . Заметим, что при  $M_{L2} = 0,05$  величина тепловой эффективности в начальных сечениях превышает единицу за счет испарения выпавших на стенку капель. Капли на стенке испаряются, и температура стенки приближается к величине температуры адиабатного испарения. Температура стенки становится ниже соответствующей величины для газовой фазы на срезе щели ( $T_W < T_2$ ). Эти выводы согласуются с данными измерений [10].

В заключение отметим, что в работе представлены численные результаты расчетов распределения локальных параметров по сечению цилиндрического канала и тепловой эффективности для газокapельной завесы на адиабатической стенке. Показано существенное влияние массовой концентрации жидкости на распределение параметров по сечению канала и тепловую эффективность.

### Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. Goldstein R.J. Film cooling // Adv. Heat Transfer. Vol. 7. P. 321–378.

4. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И. Теплообмен в турбулентных пристенных струйных течениях // Теплофизика и аэромеханика. 1997. Т. 4, № 2. С. 195–210.
5. Zhang J.Z., Zhang S.C., Wang C.H., Tan X.M. Recent advances in film cooling enhancement: A review // Chinese J. Aeronautics. 2020. Vol. 33 (4). P. 1119–1136.
6. Буалем Х., Борджан М., Бурдам М., Грине М., Аззи А. Численное исследование влияния V-образной траншеи на эффективность пленочного охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. 2023. Т. 30, № 2. С. 321–332.
7. Репухов В.М. Эффективность неравновесной газопарожидкостной тепловой завесы // Промышленная теплотехника. 1986. Т. 8, № 6. С. 11–19.
8. Лебедев В.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Массообмен при десорбции газа из мелкодиспергированных капель жидкости в пристенной двухфазной струе // Прикл. механика и технич. физика. 1995. Т. 36, № 3. С. 122–129.
9. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газокapельной струей // Теплофизика и аэромеханика. 1999. Т. 6, № 3. С. 331–340.
10. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. The thermal efficiency of near-wall gas-droplets screens. I. Numerical modeling // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2005. Vol. 48, No. 9. P. 1747–1759.
11. Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Особенности процесса парообразования вблизи стенки, охлаждаемой газокapельной завесой // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 115–123.
12. Zaichik L.I. A statistical model of particle transport and heat transfer in turbulent shear flows // Phys. Fluids. 1999. Vol. 11. P. 1521–1534.
13. Pakhomov M.A., Protasov M.V., Terekhov V.I., Varaksin A.Yu. Experimental and numerical investigation of downward gas-dispersed turbulent pipe flow // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2007. Vol. 50. P. 2107–2116.
14. Hwang C.B., Lin C.A. Improved low-Reynolds-number  $k-\varepsilon$ -model based on direct simulation data // AIAA J. 1998. Vol. 36, No. 1. P. 38–43.
15. Пахомов М.А., Терехов В.И. Влияние испарения капель на структуру течения и тепломассообмен в ограниченном закрученном газокapельном потоке за его внезапным расширением // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 6. С. 865–875.
16. Деревич И.В., Зайчик Л.И. Осаждение частиц из турбулентного потока // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 5. С. 96–104.
17. Fadai-Ghotbi A., Manceau R., Boree J. Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics // Flow, Turbulence & Combust. 2008. Vol. 81. P. 395–410.
18. Derevich I.V. Statistical modelling of mass transfer in turbulent two-phase dispersed flows. 1. Model development // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2000. Vol. 43. P. 3709–3723.
19. Picano F., Sardina G., Gualtieri P., Casciola C.M. Anomalous memory effects on transport of inertial particles in turbulent jets // Phys. Fluids. 2010. Vol. 22, No. 5. Paper 051705.

*Статья поступила в редакцию 6 августа 2024 г.,  
после доработки — 14 августа 2024 г.,  
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*