

03

Локальная структура течения при вдуве радиальной кольцевой газокапельной струи в поперечный турбулентный поток газа

© М.А. Пахомов, В.И. Терехов

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

E-mail: pma41976@yandex.ru, terekhov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 10 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 3 мая 2025 г.

Принято к публикации 3 мая 2025 г.

Выполнен численный анализ структуры течения газокапельной струи, вдуваемой через радиальную кольцевую щель в поперечный однофазный воздушный поток в трубе. Расчеты проведены с использованием осесимметричного RANS-подхода. Турбулентность газа описывается с применением модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений, записанной с учетом двухфазности течения. Получены численные данные по локальной структуре течения и длине области рециркуляции течения при вариации в широком диапазоне параметра вдува ($m = 0.5-4$), начальных массовой концентрации капель $M_{L2} = 0-10\%$ и числа Стокса $Stk = 0.5-10.7$. Увеличение параметра вдува в диапазоне $m = 0.5-4$ вызывает рост длины отрывной области почти в 3 раза. С ростом параметра вдува наблюдается увеличение коэффициента сопротивления.

Ключевые слова: RANS, численное моделирование, модель переноса рейнольдсовых напряжений, турбулентность, радиальная щелевая газокапельная струя, поперечный поток, труба, структура потока.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.15.60804.20341

Вдув радиальных кольцевых или плоских струй в поперечный сносящий поток газа в трубе (или в канале) часто используется для интенсификации процесса смешения в камере сгорания энергоустановок. Несмотря на простоту организации такого вдува, данный метод тепловой защиты имеет довольно сложную для изучения гидродинамику течения даже для случая вдува однофазного потока охладителя через отверстие по нормали в поперечный сносящий поток в канале [1–3]. В случае когда радиальная струя вдувается по нормали в поперечный газовый поток, создается зона отрывного течения за препятствием в виде самой струи. Поэтому исследование процесса смешения, динамики развития потока и потерь полного давления при вдуве радиальной кольцевой струи по нормали к оси основного турбулентного течения имеет важное научное и практическое значение. Отметим, что основная масса исследований посвящена изучению процесса вдува струи через одиночные отверстия различной формы или щели в плоский канал для изотермического случая [1–3]. Теплоперенос между вдуваемой однофазной струей через круглое отверстие или плоскую щель в поперечный поток в плоский канал был экспериментально исследован в [4–6].

Процесс смешения и теплообмена в случае вдува через кольцевую щель в трубу заметно отличается от вдува через отверстие в плоский канал при наличии поперечного потока. Такой случай является заметно менее исследованным, и в литературе представлены работы только для однофазного режима течения [7]. В этой работе были выполнены измерения локальной структуры, распределения статического и динамического давлений и гидравлического сопротивления, а также

разработан инженерный метод расчета гидравлического сопротивления для изотермического случая вдува.

Известно, что добавление испаряющихся капель в газовый поток вызывает значительную интенсификацию теплопереноса (до нескольких раз в сравнении с однофазным течением) [8,9]. Авторам неизвестны другие работы по исследованию вдува газокапельного потока охладителя через кольцевую щель в поперечный нагретый поток, за исключением [10]. Настоящая работа является продолжением [10], где были получены результаты моделирования тепловой эффективности при вдуве радиальной газокапельной струи в турбулентный воздушный поток в трубе. Целью настоящей работы является проведение численного исследования локальной структуры при вдуве кольцевой газокапельной струи в турбулентный поперечный однофазный поток нагретого воздуха (рис. 1).

С целью решения задачи используются осесимметричные стационарные RANS-уравнения, записанные с учетом влияния испаряющихся капель на процессы переноса в газе [10]. Для описания динамики течения и теплопереноса в газовой и дисперсной фазах используется эйлеров континуальный подход. Турбулентность несущей фазы описывалась с использованием эллиптической модели переноса рейнольдсовых напряжений [11], записанной с учетом двухфазности потока [10]. Схематическое представление течения приведено на рис. 1. Объемная концентрация капель во вторичном течении мала ($\Phi_2 = M_{L2} \rho_2 / \rho_{L2} \leq 1.2 \cdot 10^{-4}$), и они достаточно мелкие (начальный диаметр $d_2 = 10-50 \mu\text{m}$). Здесь M_{L2} — начальная массовая концентрация капель, ρ_2 и ρ_{L2} — плотность газа и капель, поэтому дробление

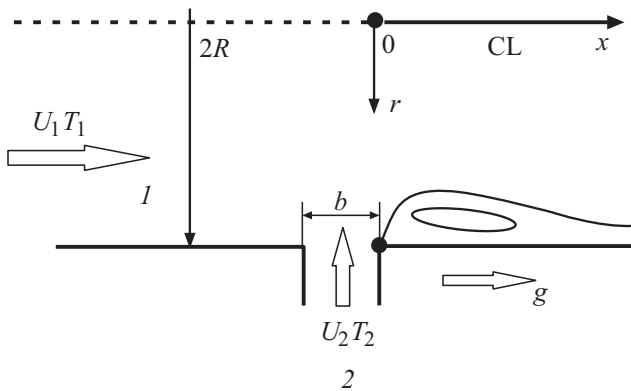


Рис. 1. Схема развития пристенной газокapельной струи при ее вдуве через кольцевую щель по нормали к основному потоку (не в масштабе). 1 — основной поток однофазного нагретого газа, 2 — вторичный кольцевой газокapельный поток охладителя, CL — ось симметрии трубы.

и коалесценция капель в потоке не принимаются во внимание [8,10].

Все численные расчеты выполнены для смеси воздуха с каплями воды при вдуве радиальной кольцевой двухфазной струи в трубу для случая вертикального опускного движения однофазного воздушного потока при атмосферном давлении (рис. 1). Диаметр трубы составлял $2R = 100$ мм, ширина кольцевой щели равнялась $b = 5$ мм ($b/R = 0.1$). Вычислительную область составляет участок протяженностью от $(-5-30)R$ для основного цилиндрического канала, и длина вычислительного блока подводящей трубы для вторичного потока составляла $(-2.5-0)R$. Среднерасходная скорость газа (воздуха) во входном сечении $U_1 = 15$ м/с, а вторичного течения (воздух и капли воды) варьировалась в диапазоне $U_2 = 6-47.5$ м/с, при этом параметр вдува изменялся в широком диапазоне $m = \rho_2 U_2 / (\rho_1 U_1) = 0.5-4$. Числа Рейнольдса для газовой фазы, построенные по параметрам основного и вторичного потоков, равны $Re_1 = U_1 2R / \nu_1 = 6.5 \cdot 10^4$ и $Re_2 = U_2 b / \nu_2 = (0.2-1.6) \cdot 10^4$, где нижние индексы 1 и 2 соответствуют основному и вторичному потокам и ν — коэффициент кинематической вязкости. Число Стокса осредненного движения $Stk = \tau / \tau_f = 0.5-10.7$ — параметр, характеризующий поведение частиц в потоке. Оно представляет собой отношение времени динамической релаксации с учетом отклонения от закона обтекания Стокса $\tau = \rho_{L2} d_2^2 / (18 \mu_2 W)$ к характерному турбулентному временному макромасштабу τ_f ($\tau_f = b / U_2$ — турбулентный временной макромасштаб, рассчитанный по параметрам вторичного потока). Здесь μ — динамическая вязкость несущего потока, $W = 1 + 0.15 Re_L^{0.687}$, $Re_L = |U_{S2} - U_{L2}| d_2 / \nu_2$ — число Рейнольдса дисперсной фазы, U_{S2} и U_{L2} — векторы осредненной скорости газовой фазы в точке расположения капли и дисперсной фазы соответственно.

Температуры фаз во вторичном двухфазном потоке во входном сечении были постоянными и равнялись $T_{L2} = T_2 = 293$ К, а массовые концентрации капель воды $M_{L2} = 1-10\%$ и водяного пара $M_{V2} = 0.01\%$ при начальном диаметре капель воды $d_2 = 10-50$ мкм. Температура основного потока воздуха $T_1 = 373$ К, стенка трубы была теплоизолированной, и на нее могли осаждаться капли из двухфазного турбулентного потока. Процесс осаждения капель в модели учитывается только в уменьшении их количества в следующем расчетном сечении. На стенке не формируется жидкая пленка аналогично [8,10].

Численное решение было получено методом конечных объемов на разнесенных сетках с использованием численного кода, разработанного авторами. Для конвективных слагаемых дифференциальных уравнений применялись процедура QUICK третьего порядка точности и центральные разности второго порядка точности для диффузионных потоков. Коррекция поля давления осуществлялась согласно процедуре SIMPLEC. Сетка была неоднородной и сгущалась по направлению к стенке трубы и к сечению вдува. Все расчеты были проведены на сетке, содержащей 400×100 (в аксиальном и радиальном направлениях) контрольных объемов (КО) в основном цилиндрическом канале и 25×100 КО в подводящем кольцевом канале для вторичного течения. Дальнейшее увеличение их числа не оказывает существенного влияния на результаты численных расчетов.

На рис. 2, а представлены профили массовой концентрации капель при вариации параметра вдува. При испарении капель и смешении с основным потоком концентрация дисперсной фазы уменьшается. Ее величина $M_L / M_{L2} \approx 0$ в ядре основного течения для случаев умеренных значений параметров вдува ($m \leq 2$). Рост параметра вдува приводит к увеличению глубины проникновения кольцевой нормальной двухфазной струи в поперечный однофазный воздушный поток. Соответственно положение максимума концентрации дисперсной фазы также незначительно сдвигается в сторону оси трубы. Одним из важнейших интегральных параметров для отрывных течений является длина отрывного течения. Эти данные показаны на рис. 2, б при вариации массовой концентрации капель и их начального диаметра при $Stk = 0-10.7$. Также отметим, что протяженность рециркуляционной области для одно- и двухфазного течений практически не изменяется (отличие достигает 6% для $M_{L2} = 0.1$). Изменение основных параметров дисперсной фазы в исследованном в работе диапазоне практически не оказывает влияния на длину отрывной зоны. Тогда как увеличение параметра вдува с $m = 0.5$ до $m = 4$ вызывает значительный рост длины отрывной области почти в 3 раза: от $x_R \approx 1.5R$ до $x_R \approx 5.2R$. Авторы дополнительно провели расчеты для изотермического газокapельного течения с целью выявления роли массопереноса за счет испарения капель на локальную структуру течения при вдуве радиальной двухфазной струи в основной газовый поток. Было

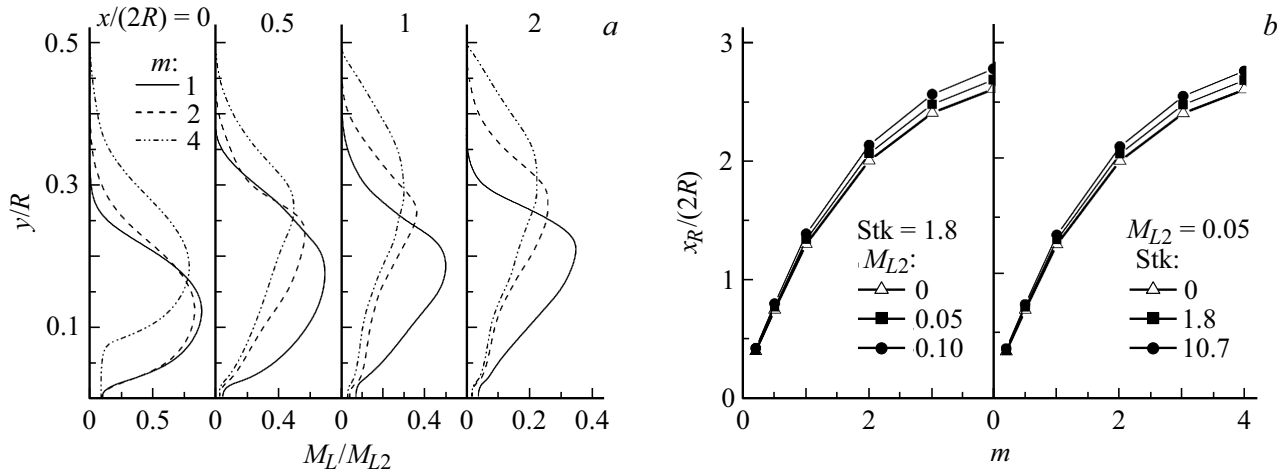


Рис. 2. Влияние параметра вдува на профили концентрации капель ($d_2 = 20 \mu m$, $Stk = 1.8$, $M_{L2} = 0.05$) (a) и добавления дисперсной фазы на протяженность зоны рециркуляции течения (b).

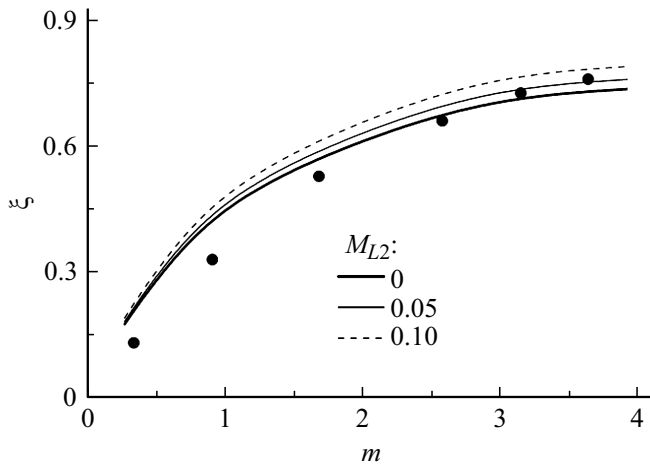


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ при вдуве радиальной кольцевой одно- и двухфазной газокapельной струи при вариации параметра вдува. Точки — измерения [7], линии — расчет настоящей работы. Условия проведения измерений [7]: $b = 2.2 \text{ mm}$, $G_2 = \rho_2 U_2 b = 22 \text{ g/s}$, $2R = 34 \text{ mm}$, $Re_1 = 5.5 \cdot 10^4$.

выявлено, что на профилях осредненной аксиальной скорости газа это влияние незначительно и не превышает 4 %.

Данные по расчету коэффициента гидравлического сопротивления ξ при вдуве радиальной кольцевой газокapельной струи, вдуваемой в основной воздушный поток, $\xi = 2(P_1 - P_{1,out})/(\rho_{1,out} U_{m1,out}^2)$ представлены на рис. 3. Здесь P_1 и $P_{1,out} = P_{1,out}^{st} + \rho_{1,out} U_{m1,out}^2/2$ — полное давление на оси на входе в канал и на его выходе соответственно. Данные приведены в виде зависимостей коэффициента ξ от параметра вдува m . Показано, что с ростом параметра вдува наблюдается увеличение коэффициента сопротивления и для больших значений ($m > 3$) данные по коэффициенту сопротивления ξ при

вдуве двухфазной радиальной кольцевой струи в основной сносимый поток газа слабо зависят от параметра вдува m . Отметим, что сравнение с данными экспериментов носит в основном качественный характер, так как условия [7] заметно отличаются от условий проведения настоящих расчетов.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Т.А. Гиршович, *Турбулентные струи в поперечном потоке* (Машиностроение, М., 1993).
- [2] A.R. Karagozian, *Prog. Energy Combust. Sci.*, **36** (5), 531 (2010). DOI: 10.1016/j.pecs.2010.01.001
- [3] T.F. Fric, A. Roshko, *J. Fluid Mech.*, **279**, 1 (1994). DOI: 10.1017/S0022112094003800
- [4] J. Andreopoulos, *Phys. Fluids*, **26** (11), 3201 (1983). DOI: 10.1063/1.864092
- [5] S. Wittig, V. Scherer, *ASME J. Turbomach.*, **109** (4), 572 (1987). DOI: 10.1115/1.3262150
- [6] S. Baldauf, M. Scheurlen, A. Schulz, S. Wittig, *ASME J. Turbomach.*, **124** (4), 699 (2002). DOI: 10.1115/1.1505848
- [7] В.И. Терехов, Ю.М. Мшвидобадзе, *Теплофизика и аэромеханика*, **7** (1), 69 (2000).
- [8] М.А. Пахомов, В.И. Терехов, *Письма в ЖТФ*, **49** (7), 16 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.07.54915.19453 [M.A. Pakhomov, V.I. Terekhov, *Tech. Phys. Lett.*, **49** (4), 14 (2023). DOI: 10.21883/TPL.2023.04.55868.19453].

- [9] А.А. Левин, П.В. Хан, Письма в ЖТФ, **50** (4), 19 (2024).
DOI: 10.61011/PJTF.2024.04.57095.19762 [A.A. Levin,
P.V. Khan, Tech. Phys. Lett., **50** (2), 58 (2024).
DOI: 10.61011/TPL.2024.02.57987.19762].
- [10] M.A. Pakhomov, J. Eng. Thermophys., **33** (4), 586 (2024).
DOI: 10.1134/S1810232824040106
- [11] A. Fadaei-Ghotbi, R. Manceau, J. Boree, Flow, Turbulence
Combust., **81** (3), 395 (2008).
DOI: 10.1007/s10494-008-9140-8