

УДК 536.24

Структура пристенной газокапельной завесы, вдуваемой через круглые отверстия в поперечную траншею. Сравнение эйлерова и лагранжева подходов*

М.А. Пахомов, В.И. Терехов

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

E-mails: pakhomov@ngs.ru, terekhov@itp.nsc.ru

Выполнен численный анализ структуры течения и тепловой эффективности пристенной газокапельной завесы, вдуваемой через наклонные отверстия в поперечную к потоку траншею. Расчет выполнен с использованием трехмерных RANS-уравнений в следующих диапазонах параметров двухфазного потока: начальный размер капель $d_1 = 0\div 20$ мкм и их массовая концентрация $M_{L1} = 0\div 0,05$. Турбулентность газа моделируется с применением модели переноса компонент рейнольдсовых напряжений с учетом двухфазности течения. В работе выполнено сравнение полученных результатов расчетов с использованием эйлерова и лагранжева описаний. Показана применимость обоих подходов для описания динамики и теплообмена двухфазной пристенной струи.

Ключевые слова: пленочное охлаждение, тепловая эффективность, газокапельная пристенная завеса, вдув через отверстия, траншея, численный расчет.

Введение

Непрерывное повышение температуры газа перед турбиной является основным фактором роста тепловой эффективности и мощности энергетической установки. К настоящему моменту величина таких температур уже превышает 1800 К и имеет тенденцию к дальнейшему возрастанию. Данное значение заметно выше рабочих температур используемых современных материалов. В этой связи возникает необходимость охлаждения рабочих поверхностей энергетических установок при воздействии высокоэнтальпийного потока газа. Тепловая защита стенки от воздействия высокоэнтальпийных потоков с помощью пристенных завес остается актуальной и важной задачей при разработке различных энергетических машин и установок на протяжении уже более полувека (см. монографии [1–3] и обобщающие обзоры [4–7]). Весьма эффективным и простым методом тепловой защиты для практической реализации является вдув охлаждающего газа в пристенную область через систему наклонных отверстий в защищаемой поверхности. Такой способ защиты поверхности наиболее распространен при охлаждении лопаток газовых турбин и стенок камер сгорания [4–7]. Он, однако, не лишен заметных недостатков:

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РНФИ (проект РФФИ № 18–08–00386).

существенной неравномерности охлаждения в трансверсальном направлении, малой протяженности зоны с высокой тепловой эффективностью пристенной завесы и заметного снижения эффекта тепловой защиты при больших параметрах вдува струи: ($m = \rho_2 U_2 / \rho_1 U_1 > 1$ [2, 4], здесь ρ — плотность газа, U — осредненная продольная скорость газа, индексы 1 и 2 соответствуют параметрам течения основного и вторичного потоков). Исходя из перечисленного, поиск новых эффективных способов подачи охладителя по-прежнему остается актуальной проблемой как с научной, так и с практической точек зрения.

Одним из эффективных способов, позволяющим получить существенное повышение тепловой защиты стенки, а также улучшить равномерность распределения охлаждения в трансверсальном направлении, является подача охладителя через отверстия в поперечную траншею. В последнее время внимание этой задаче уделяется в экспериментальных [7–9] и численных [10, 11] исследованиях. Организация пристенных двухфазных газочапельных завес также является эффективным способом увеличения тепловой эффективности. Основным механизмом повышения теплозащитных свойств при применении двухфазной системы является использование энергии фазового перехода при испарении капель в непосредственной близости от защищаемой поверхности. Идее использования газочапельных пристенных струй для охлаждения поверхности уже около 50 лет. За последние несколько десятилетий в литературе представлено большое количество работ по исследованию газочапельных пристенных завес.

Экспериментальные исследования пристенных газочапельных завес представлены в работах [12–15]. Было показано значительное повышение эффективности завесного охлаждения (до 1,5–2 раз) для газочапельной пристенной завесы по сравнению с однофазной завесой при относительно малых содержаниях жидкой фазы во вдуваемой струе (до 5–10 % по массе вторичного потока). Экспериментальное исследование структуры течения и тепловой эффективности таких течений сопряжено со значительными сложностями. Большие проблемы возникают при переносе результатов, полученных в лабораторных условиях, на реальные объекты. По этой причине численное моделирование может рассматриваться как приоритетный метод исследования. Для численного описания двухфазного потока предлагаются два основных метода расчета. Первый метод — эйлерово континуальное описание — так называемые двухжидкостные модели. Ко второму методу относят лагранжев траекторный подход. Оба эти метода имеют свои плюсы и минусы и дополняют друг друга. Для описания динамики дисперсной фазы в двухфазных турбулентных пристенных завесах чаще применяется лагранжев метод [16–19] и несколько реже эйлеров подход [20, 21].

Модель двухфазной завесы, основанная на использовании лагранжева подхода, была представлена в работе [16]. Здесь изучалась возможность применения различных моделей турбулентности для расчета динамики двухфазной завесы. Численное исследование влияния формы и температуры основного потока на равномерность распределения пристенной завесы при различных соотношениях форм выходных отверстий проводилось в работе [17]. Было показано, что отверстия с различными конфигурациями выходной кромки демонстрируют заметно лучшую равномерность распространения данной завесы в поперечном к основному потоку направлении в сравнении с обычными наклонными отверстиями. Тепловая эффективность $\eta = (T_{AW} - T_1) / (T_2 - T_1)$ пристенной завесы для такого случая отверстий также имеет заметно более высокую величину. Здесь T_{AW} — температура адиабатической стенки, T_1 , T_2 — температура основного и вторичного потоков. Работа [19] посвящалась численному исследованию с использованием лагранжева приближения для описания вдува пристенной газочапельной завесы вдоль плоской пластины. Было получено заметное увеличение тепловой эффективности: более 60 %

при величине массовой концентрации капель $M_{L1} = 6\%$ и их начальном диаметре $d_1 = 5$ мкм.

В работе [20] была разработана модель и выполнено численное исследование структуры течения и тепловой эффективности пристенной газочапельной завесы. Указанная модель использует эйлеров подход, турбулентность описывается $k-\varepsilon$ моделью с учетом двухфазности течения. Здесь же был выполнен анализ влияния основных параметров двухфазного потока (диаметра капель и их концентрации) на структуру течения и тепловую эффективность. Позже авторами была разработана трехмерная численная модель расчета в эйлеровом приближении для расчета двухфазного турбулентного пристенного потока и проведено моделирование тепловой эффективности газочапельной завесы при ее вдуве через наклонные цилиндрические отверстия в поперечную траншею [21].

Для описания турбулентности газовой фазы в двухфазном потоке достаточно часто для инженерных расчетов применяются различные модификации двухпараметрических изотропных моделей [16, 18–20]. Такие модели турбулентности, например, $k-\varepsilon$ модель, при описании сложных течений с отрывными зонами и областями с рециркуляцией течения имеют ряд серьезных ограничений [22]. Одним из методов, позволяющим частично учитывать сложные процессы смешения и анизотропию компонент пульсаций скорости газа в отрывных закрученных течениях, является использование моделей переноса рейнольдсовых напряжений (в англоязычной литературе — Second moment closure). Эта модель с успехом применяется для описания турбулентных характеристик несущей фазы в пристенных одно- [11] и двухфазных струях [16, 17, 21].

В настоящей работе представлены результаты сравнения возможностей эйлерова и лагранжева методов описания влияния динамики дисперсной фазы на структуру течения и тепловую эффективность газочапельной пристенной завесы, вдуваемой через наклонные отверстия в поперечную к потоку траншею. Перспективность такого способа организации пристенной завесы была показана ранее как для одно- [11], так и для двухфазного газочапельного [21] режима течения.

Эйлеров подход

Для описания динамики течения и тепломассопереноса в газовой и дисперсной фазах используется эйлеров подход. Система уравнений для моделирования движения дисперсной фазы в эйлеровом континуальном представлении получена из кинетического уравнения для функции плотности вероятности распределения частиц в турбулентном потоке [23]. Заметим, что первоначально метод был разработан для описания течений с твердыми частицами в отсутствие межфазного теплообмена. В настоящей работе этот подход применяется для описания двухфазных течений при наличии испарения капель. При решении используются трехмерные осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье–Стокса (RANS уравнения), записанные с учетом влияния частиц на процессы переноса в газе. Для описания турбулентности газа применялась модель переноса рейнольдсовых напряжений [24], модифицированная на случай наличия дисперсной фазы [25]. Использование этого подхода позволило отказаться от гипотезы изотропной вязкости, строго говоря, неприменимой для расчета отрывных течений. Для расчета пульсаций скорости дисперсной фазы используется дифференциальная модель переноса рейнольдсовых напряжений. Пульсации температуры и турбулентный тепловой поток частиц описываются в рамках моделей [25]. Более подробно основные уравнения модели и методика численной реализации рассматривались в работе [21], там же было проведено тестирование численного алгоритма при сопоставлении с данными измерений для двухфазных пристенных завес.

Лагранжево описание

Газовая фаза рассчитывается так же, как и в эйлеровом подходе. В лагранжевом методе влияние наличия частиц на течение несущего газа реализуется с использованием подхода [26]. Переход от результатов расчетов траекторий частиц к распределениям параметров дисперсной фазы в физическом пространстве (например, при расчете концентрации капель) осуществляется путем пространственного или пространственно-временного осреднения по всем траекториям частиц по контрольному объему эйлеровой сетки, используемой для расчета поля газовой фазы [26]. При расчетах динамики частиц обычно используется известная модель Stochastic Separated Flow (SSF) [27], учитывающая стохастическое влияние турбулентности газа на движение частицы или ее различные модификации (см., например, [28]).

Принимается во внимание действие следующих факторов на динамику частицы: сил аэродинамического сопротивления, тяжести, Сэффмена и силы, учитывающей градиент давления несущей среды. Одной из проблем является подбор метода расчета мгновенной (актуальной) скорости газовой фазы в точке расположения частицы $U_{S,i}$. Скорость $U_{S,i}$ необходима для расчета силы аэродинамического сопротивления в рамках лагранжева подхода. В настоящей работе используются известный подход Continuous Random Walk [28]: $U_{S,i} = U_i + u_{S,i}$, где U_i и $u_{S,i}$ — компоненты осредненной скорости газа (определяются непосредственно из RANS-расчета), и мгновенная скорость газа в точке расположения частицы, определяемая из подхода [28]. Существует ряд модифицированных SSF-моделей, основное отличие которых от известной модели [27] заключается в том, что в них межфазное взаимодействие рассматривается как непрерывный процесс. При этом в уравнениях движения используется осредненная скорость фаз. Случайные среднеквадратичные пульсации дисперсной фазы рассчитываются вдоль стохастической траектории, что позволяет сохранить стохастический характер движения дисперсной фазы. Выражение для расчета мгновенной величины скорости газа в точке расположения частицы имеет вид [28]:

$$u_{S,i}^m = a_{ij}u_{S,j}^{m-1} + b_{ij}\zeta_j + \mathbf{A}_i\Delta t, \quad \zeta_i \in N(0, 1),$$

здесь надстрочный символ m относится к текущему временному шагу, $N(0, 1)$ — случайная гауссова величина, имеющая распределение со средним значением, равным нулю, и среднеквадратичным отклонением, равным единице, \mathbf{A} — вектор скорректированного смещения, Δt — шаг по времени. Для расчета компонент вектора скорректированного смещения применяется выражение [29]

$$\mathbf{A}_{ij} = \frac{1}{1 + \text{St}_L} \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_{ij}) \right], \quad \text{St}_L = \frac{\tau}{1/7(k/\varepsilon)},$$

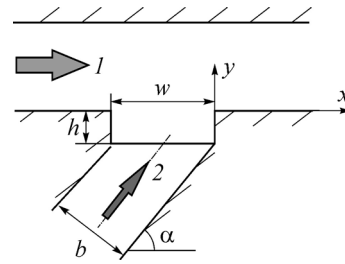
где $\tau = \frac{d_1 \rho_{L2}}{3\rho C_D |\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_{L,i}|/4}$ — время динамической релаксации частиц. Тензоры смещения a и диффузии b определяются из следующих соотношений, приведенных в [28]:

$$a_{ij} = \exp\left(-\frac{\Delta t}{\Omega_L}\right) \delta_{ij}, \quad b_{ik}b_{jk} = (1 - a_{ii}a_{jj})u_{ij},$$

где Ω_L — турбулентный временной масштаб [30].

Рис. 1. Схема развития пристенной двухфазной завесы, вдуваемой в поперечную траншею.

1 — однофазный основной поток нагретого воздуха,
2 — пристенная газокapelная завеса.



Численный метод

Схематическое представление развития пристенной двухфазной завесы и геометрия течения показаны на рис. 1 и соответствуют описанным в работе [21]. Численное решение было получено с использованием метода контрольных объемов на разнесенных сетках. Для конвективных слагаемых дифференциальных уравнений применялся алгоритм QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics). Для диффузионных потоков были использованы формулы центральных разностей. Коррекция поля давления осуществлялась по конечно-объемному согласованному алгоритму SIMPLEX (Semi-Implicit Pressure-Linked Equation Corrected). Граничные, входные и выходные условия подробно описывались в работе [21]. Для капель на стенках ставились «эластичные» граничные условия — когда частица после контакта с ограничивающей поверхностью возвращается в поток без потери импульса. В работе не рассматриваются эффекты дробления капель ввиду малости числа Вебера We , рассчитанного по межфазной скорости и параметрам вторичного потока. Диапазон изменения чисел Вебера в данном исследовании составляет $We = \rho(U - U_L)^2 d_1 / \sigma = (0,3 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$, что значительно меньше критического числа Вебера $We_* = 7$ [16, 18]. Влиянием коалесценции капель также можно пренебречь из-за малости объемной доли частиц ($\Phi_2 \leq 10^{-4}$).

Результаты численных расчетов и анализ полученных результатов

Диаметр отверстий для подачи двухфазного охладителя $b = 3,2$ мм, длина большей оси выходного эллипса равна двум диаметрам отверстия и соответствует ширине траншеи ($w = 6,4$ мм). Расчеты выполнены для однорядной системы из трех отверстий, расположенных под углом $\alpha = 30^\circ$ в траншее глубиной $h = 2,4$ мм и шириной $w = 6,4$ мм ($h/w = 0,375$, $h/b = 2$). Поперечный шаг отверстий составлял $t = 10$ мм ($t/b = 3,13$). Расстояние x отсчитывалось от задней кромки траншеи, а поперечное расстояние z — от центральной линии среднего (второго) отверстия. Воздух в основном потоке с температурой $T_1 = 323 \div 573$ К считался сухим. Температура вторичного двухфазного потока была постоянной и равной $T_{L1} = T_2 = 293$ К, а массовые концентрации капель воды и водяного пара составляют соответственно $M_{L1} = 0,01 \div 0,05$ и $M_{V1} = 0,005$ при начальном диаметре капель воды $d_1 = 1 \div 20$ мкм. Высота плоского канала $H = 30$ мм ($H/b = 9,375$), средняя скорость основного однофазного потока воздуха $U_1 = 30$ м/с, а вторичного газокapelного — $U_2 = U_{L2} = 10 \div 30$ м/с, параметр вдува изменялся в широком диапазоне $m = 0,25 \div 2,5$. Числа Рейнольдса, построенные по эквивалентному гидравлическому диаметру канала и параметрам основного и вторичного потоков, составляют: $Re_1 = U_1 H / \nu_1 = 7,8 \cdot 10^4$ и $Re_2 = U_2 b / \nu_2 = (1,5 \div 12,5) \cdot 10^3$. В настоящей работе при проведении расчета с использованием лагранжева подхода в качестве базового было выбрано количество частиц, равное 25000. Время расчета по лагранжеву методу превышает соответствующую величину для эйлера метода в среднем на 10–20 %. Результаты всех расчетов, приведенных на рис. 2–5, получены на оси среднего отверстия для условия адиабатической стенки.

На рис. 2 показаны поперечные профили осредненной продольной компоненты скорости газовой (рис. 2a) и дисперсной (рис. 2b) фаз в нескольких сечениях по длине

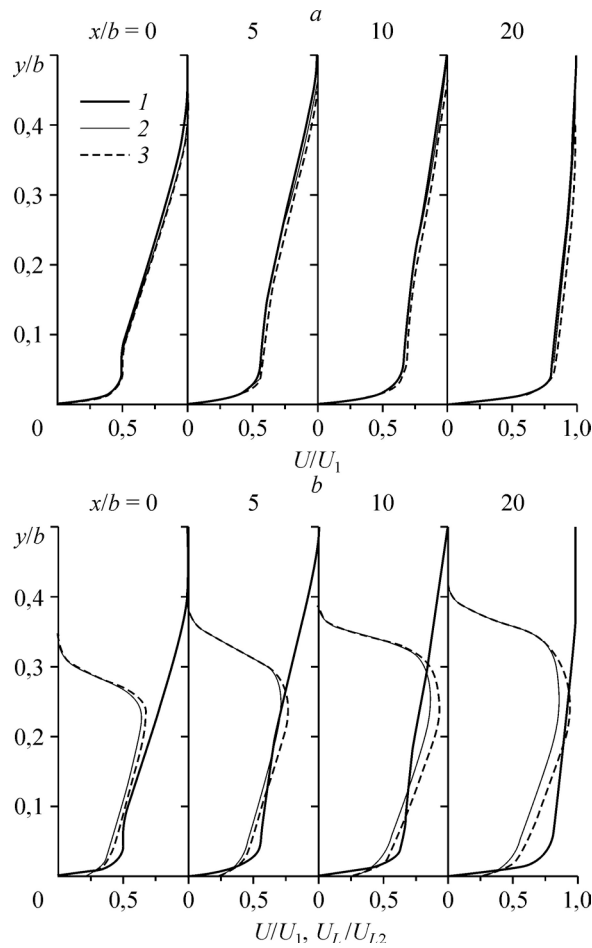


Рис. 2. Профили осредненной продольной скорости газовой (а) и дисперсной (б) фаз по высоте канала в двухфазной пристенной завесе, вдуваемой в поперечную траншею. а: 1 — однофазный воздушный поток, 2, 3 — газ в двухфазном потоке в эйлеровом и лагранжевом приближениях соответственно; б: 1 — газ в двухфазном течении (эйлеров подход), 2 — капли (эйлерово приближение), 3 — капли (лагранжево описание); $M_{L1} = 0,02$, $d_1 = 10$ мкм, $H = 30$ мм, $U_1 = 30$ м/с, $U_2 = 11,8$ м/с, $m = 0,5$, $T_1 = 373$ К, $T_2 = 293$ К.

плоского канала за задней кромкой траншеи для величины массовой концентрации капель на входе $M_{L1} = 0,02$. Из рис. 2а видно, что профили скорости газовой фазы практически не зависят от метода расчета динамики дисперсной фазы по эйлерову (2) и лагранжеву (3) подходам. Величина скорости газа в двухфазном потоке практически совпадает со значением скорости газа в однофазном потоке, что объясняется крайне малым значением величины концентрации капель и малым эффектом воздействия частиц на газовую фазу. Это согласуется с данными недавних расчетов авторов по двухфазному газодисперсному отрывному [31] и закрученному [32] течениям за внезапным расширением трубы. Профили продольной скорости капель (см. рис. 2б), рассчитанные по эйлерову (2) и лагранжеву (3) подходам имеют качественно подобный вид. Отличие в результатах расчетов по этим двум подходам не превышает 12 %. Необходимо отметить, что вниз по потоку скорость скольжения фаз возрастает, особенно в пристенной зоне.

На рис. 3 представлены распределения размера капель и их массовой концентрации по высоте канала. Видно, что поперечные распределения размера частиц и их количества по длине канала имеют качественно подобный вид. Отметим, что первоначально

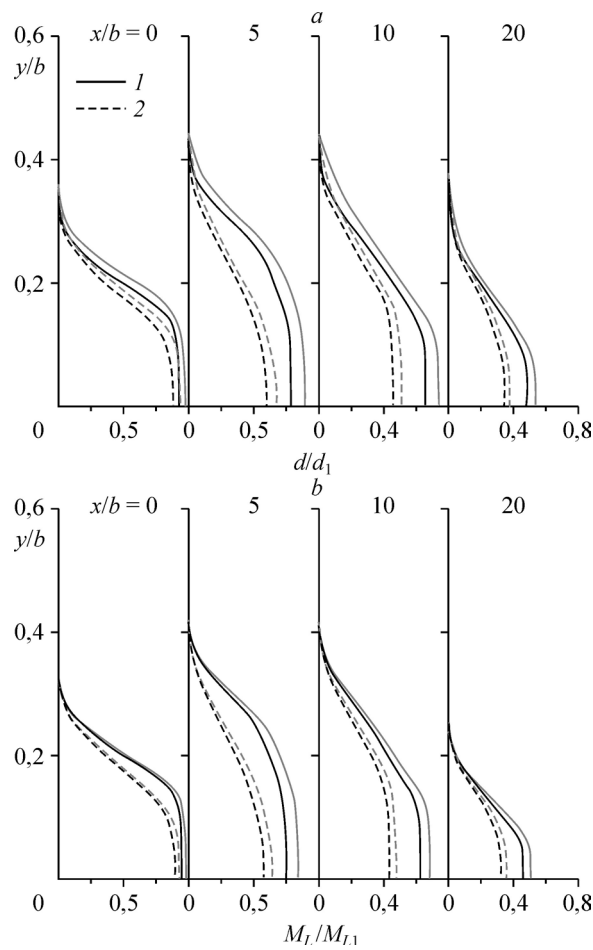


Рис. 3. Распределения диаметра капель (а) и массовой концентрации дисперсной фазы (b) по сечению канала при вариации концентрации капель.

Серые линии — лагранжев подход, черные линии — эйлерово описание; $M_{L1} = 0,02$ (1), 0,05 (2).

по мере продвижения по длине канала за счет процессов смешения происходит увеличение высоты области существования двухфазной струи: от $y/b \approx 0,3$ при $x/b = 0$ до $y/b \approx 0,43$ при $x/b = 10$. Далее за счет испарения капель происходит снижение высоты области двухфазного течения, что объясняется прогревом верхней части пристенной завесы при ее смешении с основным нагретым потоком ($y/b \approx 0,2$ при $x/b = 20$). Расчеты по обоим подходам дают близкие значения по высоте двухфазной струи — разница не превышает 5%. В отличие от эйлерова метода, лагранжев подход предсказывает несколько большую величину размера частиц и их массовой концентрации (на 10–20%). Таким образом, можно сделать вывод, что согласно лагранжеву описанию капли испаряются более медленно, чем по эйлеровой модели.

На рис. 4 приведены относительные профили температуры газовой $\Theta = (T - T_{AW})/(T_1 - T_2)$ (а) и дисперсной $\Theta_L = (T_L - T_1)/(T_{L2} - T_1)$ (b) фаз для значения массовой концентрации дисперсной фазы $M_{L1} = 5\%$. Здесь T , T_L и T_{L2} — температуры газа и капель в рассматриваемой точке и капель во входном сечении соответственно. Из рис. 4а видно, что влияние методов расчета температуры дисперсной фазы по эйлерову (2) и лагранжевым (3) подходам на величину температуры газа минимально. На рис. 4b приведены поперечные распределения температуры капель для величины $M_{L1} = 0,02$,

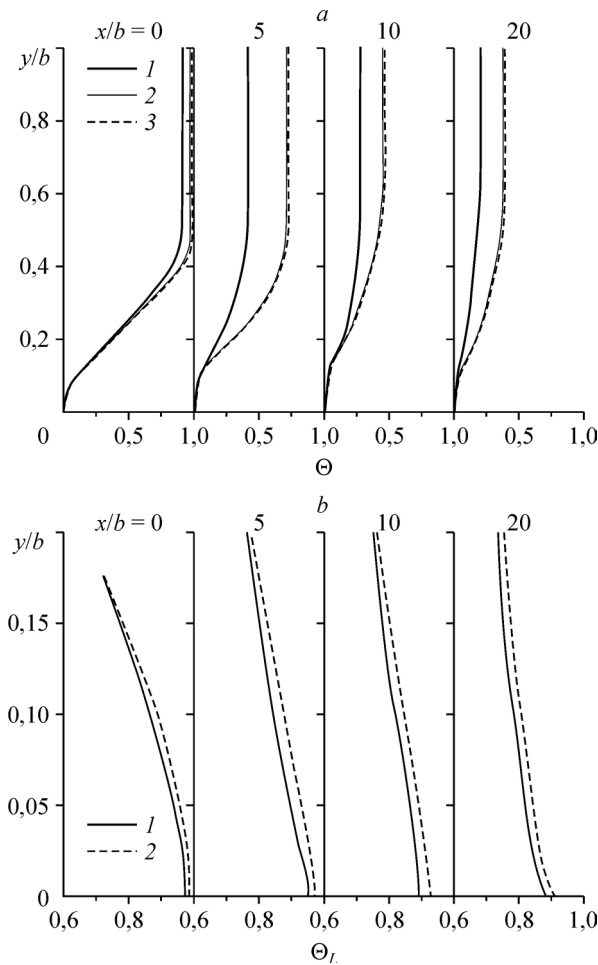


Рис. 4. Безразмерные профили температуры газовой (а) и дисперсной (b) фаз в газокapельной пристенной завесе.

a: $M_{L1} = 0,05$, 1 — $M_{L1} = 0$ (однофазный поток), 2 — эйлерово описание, 3 — лагранжев подход;

b: $M_{L1} = 0,05$, 1, 2 — эйлеров и лагранжев подходы соответственно.

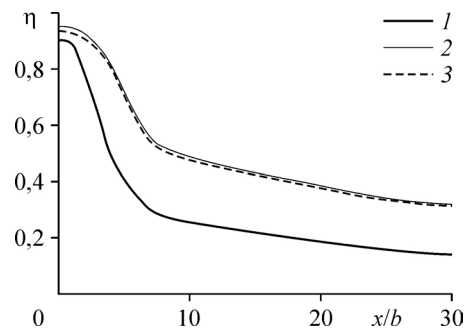
для других значений концентрации каплей получаются аналогичные результаты. Можно отметить, что максимальное отличие в результатах расчетов температуры капли достигает 15%. Температура капли, рассчитанная с использованием эйлерова подхода, выше соответствующего значения для лагранжева метода. Капли в лагранжевом описании прогреваются и испаряются более медленно, что согласуется с данными рис. 3.

Результаты численных исследований параметра тепловой эффективности $\eta = (T_{AW} - T_1) / (T_2 - T_1)$ двухфазной газокapельной пристенной завесы для различных моделей расчета динамики дисперсной фазы показаны на рис. 5. Отметим, что результаты численных расчетов с использованием эйлерова подхода (линия 2) взяты авторами из их предыдущей работы [21]. Наличие испаряющихся каплей жидкости даже при относительно небольших массовых концентрациях, не превышающих 5% от массы вторичного потока, приводит к тому, что эффективность завесы может вырасти более чем в два раза по сравнению со вдувом однофазного охладителя. При этом область интенсификации охлаждения распространяется на большие расстояния и, что особенно важно для практических целей, данный эффект растет по мере удаления от места вдува.

Рис. 5. Тепловая эффективность пристенной однофазной (1) и газокапельной (2 и 3) завес по длине канала.

$M_{L1} = 0,05$, $d_1 = 10$ мкм; 1 — $M_{L1} = 0$ (однофазная завеса), 2 и 3 — эйлеров и лагранжев подходы соответственно.

Как видно из анализа данных, приведенных на рис. 5, отличие в результатах расчетов по обоим подходам крайне мало и не превышает 3 %.



Заключение

Установлено, что влияние выбора метода моделирования динамики капель на осредненные параметры несущей газовой фазы (скорость и температуру) пристенной двухфазной завесы пренебрежимо мало. В численных расчетах с использованием лагранжева и эйлерова подходов компоненты продольной осредненной скорости частиц различаются незначительно и это отличие составляет порядка 10 %. В основном отличие результатов, полученных по эйлерову и лагранжеву подходам, проявляется при расчете концентрации капель. Эйлеров метод предсказывает меньшее значение концентрации частиц по сравнению с лагранжевым описанием как в области рециркуляции, так и в ядре течения (различие достигает 15–20 %). Отличие в результатах расчетов тепловой эффективности пристенной двухфазной завесы, полученных по обоим подходам, крайне мало и не превышает 3 %. Представленная работа является первым шагом в изучении возможностей эйлерова и лагранжева описаний при моделировании пристенных газокапельных струй. Необходимо проведение дальнейших численных и экспериментальных исследований в более широком диапазоне изменения параметров дисперсной фазы.

Список литературы

1. Репухов В.М. Теория тепловой защиты стенки вдувом газа. Киев: Наукова думка, 1980. 216 с.
2. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
3. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
4. Goldstein R.J. Film cooling // *Advance Heat Transfer*. 1971. Vol. 7. P. 321–378.
5. 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.
6. Leontiev A.I. Heat and mass transfer problems in film cooling // *Trans. ASME J. Heat Transfer*. 1999. Vol. 121. P. 509–527.
7. Bunker R.S. A review of shaped hole turbine film cooling technology // *Trans. ASME J. Heat Transfer*. 2005. Vol. 127. P. 441–453.
8. Waye S.K., Bogard D.G. High-resolution film cooling effectiveness measurements of axial holes embedded in a transverse trench with various trench configurations // *Trans. ASME J. Turbomachinery*. 2007. Vol. 129. P. 294–302.
9. Халатов А.А., Борисов И.И., Дашевский Ю.Я., Коваленко А.С., Шевцов С.В. Пленочное охлаждение плоской поверхности однорядной системой наклонных отверстий в траншее: влияние внешней турбулентности и ускорения потока // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20, № 6. С. 731–737.
10. Lee K.D., Kim K.Y. Film cooling performance of cylindrical holes embedded in a transverse trench // *Num. Heat Transfer, Part A: Applications*. 2014. Vol. 65. P. 127–143.
11. Пахомов М.А., Терехов В.И., Халатов А.А., Борисов И.И. Тепловая эффективность пристенной газовой завесы при ее вдуве через круглые отверстия в траншее // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т. 22, № 3. С. 343–352.
12. Волчков Э.П., Лебедев В.П., Терехов В.И., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование влияния концентрации мелкодисперсных капель жидкости на эффективность газовой завесы // *Сиб. физ.-техн. журн.* 1992. Вып. 1. С. 28–32.
13. Терехов В.И., Шаров К.А., Шишкин Н.Е. Экспериментальное исследование смешения газового потока с пристенной газокапельной струей // *Теплофизика и аэромеханика*. 1999. Т. 6, № 3. С. 331–340.
14. Zhao L., Wang T. An experimental study of mist/air film cooling on a flat plate with application to gas turbine airfoils. Part I: Heat transfer // *ASME J. Turbomach.* 2014. Vol. 136. P. 071006-1–071006-9.

15. **Терехов В.И., Шишкин Н.Е.** Особенности процесса парообразования вблизи стенки, охлаждаемой газокapельной завесой // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 115–123.
16. **Li X., Wang T.** Effects of various modelings on mist film cooling // ASME J. Heat Transfer. 2007. Vol. 129. P. 472–482.
17. **Kanani H., Shams M., Ebrahimi R.** Numerical modelling of film cooling with and without mist injection // Heat Mass Transfer. 2009. Vol. 45. P. 727–741.
18. **Jiang Y., Zheng Q., Dong P., Yue G., Gao J.** Numerical simulation on turbine blade leading-edge high-efficiency film cooling by the application of water mist // Numerical Heat Transfer, Part. A. 2014. Vol. 66. P. 1341–1364.
19. **Rao P.M., Biswal P., Prasad B.V.S.S.S.** A computational study of mist assisted film cooling // Int. Comm. Heat Mass Transfer. 2018. Vol. 95. P. 33–41.
20. **Терехов В.И., Пахомов М.А.** Численное исследование тепловой эффективности двухфазной газокapельной пристенной завесы в цилиндрическом канале // Теплофизика высоких температур. 2002. Т. 40, № 4. С. 633–640.
21. **Pakhomov M.A., Terekhov V.I.** Droplet-laden mist film cooling effectiveness of cylindrical holes embedded in a transverse trench // J. Engng Thermophys. 2018. Vol. 27, No. 4. P. 387–398.
22. **Зайков Л.А., Стрелец М.Х., Шур М.Л.** Сравнение возможностей дифференциальных моделей турбулентности с одним и двумя уравнениями при расчете течений с отрывом и присоединением. Течение в канале с обратным уступом // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 5. С. 724–736.
23. **Деревич И.В., Зайчик Л.И.** Осаждение частиц из турбулентного потока // Изв. АН СССР. МЖГ. 1988. № 5. С. 96–104.
24. **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 and Combustion. 2008. Vol. 81. P. 395–410.
25. **Zaichik L.I.** A statistical model of particle transport and heat transfer in turbulent shear flows // Phys. Fluids. 1999. Vol. 11, No. 6. P. 1521–1534.
26. **Crowe C.T., Sharma M.P., Stock D.E.** The particle source in cell (PSI-Cell) method for gas-droplet flows // ASME J. Fluids Eng. 1977. Vol. 99. P. 325–332.
27. **Gosman A.D., Ioannides E.** Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors // J. Energy. 1983. Vol. 7, No. 6. P. 482–490.
28. **Moissette S., Oesterle B., Boulet P.** Temperature fluctuations of discrete particles in a homogeneous turbulent flow: a Lagrangian model // Int. J. Heat Fluid Flow. 2001. Vol. 22, Iss. 3. P. 220–226.
29. **Bocksell T.L., Loth E.** Stochastic modeling of particle diffusion in a turbulent boundary layer // Int. J. Multiphase Flow. 2006. Vol. 32. P. 1234–1253.
30. **Amani E., Nobari M.R.H.** Systematic tuning of dispersion models for simulation of evaporating sprays // Int. J. Multiphase Flow. 2013. Vol. 48. P. 11–31.
31. **Пахомов М.А., Терехов В.И.** Сравнение эйлерова и лагранжева описаний при исследовании течения и теплообмена в газокapельном осесимметричном отрывном турбулентном потоке // Прикл. механика и технич. физика. 2013. Т. 54, № 4. С. 96–108.
32. **Пахомов М.А., Терехов В.И.** Распространение твердых частиц в газодисперсном ограниченном закрученном потоке. Эйлерово и полное лагранжево описания // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 3. С. 335–348.

*Статья поступила в редакцию 17 декабря 2019 г.,
после доработки — 24 января 2020 г.,
принята к публикации 10 февраля 2020 г.*