

УДК 621.9

Экспериментальное исследование особенностей теплообмена при вдуве гелия через проницаемую поверхность в сверхзвуковой поток аргона*

А.Г. Здитовец¹, Ю.А. Виноградов¹, М.М. Стронгин¹, А.А. Титов¹, Н.В. Медвецкая²

¹ Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва;

e-mail: zditovets@mail.ru

² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Проведен анализ экспериментальных данных, полученных при вдуве легкого газа (гелий) в сверхзвуковой поток (число Маха $M = 3$) тяжелого газа (аргон) через пористый проницаемый участок. Температурные поля поверхностей проницаемого участка и находящегося за ним в области газовой завесы непроницаемого участка модели измерялись при помощи тепловизионного оборудования. При вдуве охлаждающего гелия в сверхзвуковой поток аргона обнаружено снижение температуры поверхности непроницаемой стенки, находящейся в области газовой завесы, до значений, меньших температуры поверхности проницаемой стенки. Отметим, что эта особенность не наблюдается при вдуве однородного газа в турбулентный сверхзвуковой пограничный слой.

Ключевые слова: сверхзвуковой пограничный слой, вдув инородного газа, газовая завеса, температура стенки.

Введение

Получение данных по поведению основных характеристик сверхзвукового пограничного слоя при вдуве газа является актуальной задачей вследствие широкого применения газовых завес для защиты теплонапряженных поверхностей от воздействия высокотемпературных и химически активных потоков. Газовые завесы, как правило, используются в тех случаях, когда конвективное охлаждение оказывается недостаточно эффективным для поддержания температур рабочих поверхностей на приемлемом уровне. К таким случаям относится организация тепловой защиты сопел ракетных двигателей, лопаток и элементов проточных частей газотурбинных установок, стенок камер сгорания и МГД генераторов, а также задача организации гиперзвукового горения.

Результаты ранних исследований, посвященных свойствам и поведению газовых завес, приводятся в [1, 2]. Подавляющее большинство работ посвящено газовым завесам, создаваемым при вдуве через пористый элемент однородно-

го газа «воздуха в воздух» либо «инородного газа в воздух», где в качестве инородного газа использовались аргон, гелий, фреон или водород.

В работе [3] на основании численного моделирования турбулентного пограничного слоя обнаружены парадоксальные эффекты при вдуве инородного газа в сверхзвуковой пограничный слой. В частности, показано, что температура непроницаемой поверхности в области газовой завесы может быть меньше температуры поверхности проницаемого элемента, через который происходит вдув охлаждающего газа. Этот эффект не наблюдается при вдуве однородного охлаждающего газа. Такое поведение температуры стенки объясняется влиянием на адиабатную температуру стенки числа Прандтля смеси, образующейся в пристенной области из газа основного потока и вдуваемого газа. Причем чем меньше число Прандтля, тем сильнее проявляется данный эффект. Низкие числа Прандтля могут быть получены в газовых смесях, например, водорода или гелия с аргоном или ксеноном (рис. 1).

Данная работа является продолжением [4] и посвящена экспериментальному исследованию вдува охлаждающего гелия в сверхзвуковой поток аргона, т.е. инородного легкого газа

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 11-08-00152.

в тяжелый газ основного потока, с целью подтверждения либо опровержения результатов, представленных в [3]. В сверхзвуковом пограничном слое измерены распределения давления и температуры стенки вдоль проницаемого и непроницаемого участков.

Оборудование

Описание экспериментального стенда

Экспериментальные исследования проводились на малорасходной аэродинамической установке, расположенной в лаборатории «Термогазодинамика» НИИ механики МГУ. Эскиз рабочей части представлен на рис. 2. Осесимметричное профилированное сверхзвуковое сопло 1 плавно переходит в коническую рабочую часть 2. В стенке конической части имеются два симметричных смотровых окна 3, которые при проведении эксперимента плотно закрываются инфракрасными экранами из хлорида калия KCl. Модель состоит из трех частей, склеенных воедино (рис. 2, б). К эбонитовой трубке 4, приклеивается пористая проницаемая керамическая трубка 5, которая в свою очередь соединяется со сплошным эбонитовым стержнем 6. Эбонит и керамика являются материалами с низким коэффициентом теплопроводности — 0.17 и 0.8 Вт/(м·К) соответственно, что позволяет свести к минимуму влияние продольных перетечек тепла. Модель располагается в сверхзвуковом канале коаксиально. В итоге получается осесимметричный сверхзвуковой канал с центральным телом (рис. 2, в), который пристыковывается к форка-

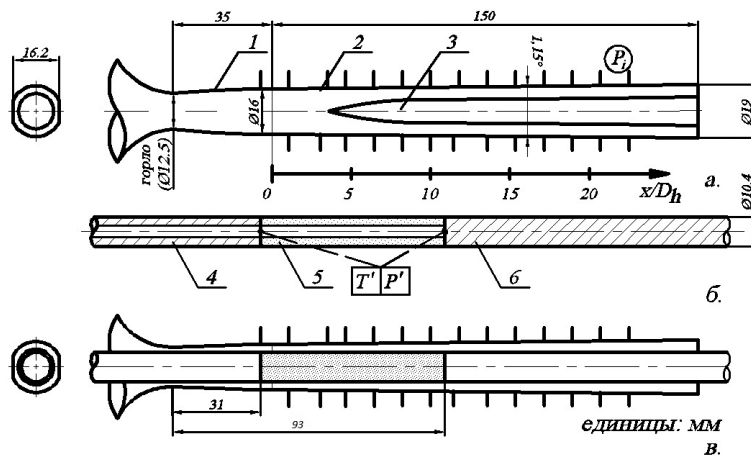


Рис. 2. Схема рабочей части экспериментального стенда: а — осесимметричное сверхзвуковое сопло (1) с коническим насадком (2), окно для инфракрасного иллюминатора (3); б — схема модели — эбонитовая трубка (4), пористая проницаемая трубка (5), непроницаемый эбонитовый стержень (6); в — схема рабочей части экспериментального стенда в собранном состоянии (сверхзвуковой канал с центральным телом)

мере. В форкамере через гибкий канал модель соединяется с системой подачи вдуваемого газа (рис. 3), который поступает из баллонов высокого давления. Аргон также подается в форкамеру из баллонов высокого давления. На стенде предусмотрена возможность подогрева электрическими нагревателями газа основного потока и вдуваемого газа.

Система измерения

Для диагностики качества сверхзвукового потока, в частности отсутствия или наличия возмущений различной интенсивности, на боковой образующей конического канала в 26 точках (по 13 с каждой стороны) с шагом ≈ 10 мм располагаются приемники статического давления P_i (рис. 2, а), еще один находится на срезе сверхзвукового сопла. Во внутреннем канале пористой проницаемой трубки (на входе и в точке соединения с эбонитовым стержнем) установлены два приемника для измерения статического давления вдуваемого газа P' (рис. 2, б). Приемник для измерения давления торможения основного потока P_0 располагается в форкамере. Измерения осуществляются с помощью датчиков абсолютного давления ИКД (измерительный комплекс давления).

Температура торможения основного потока T_0 измеряется в форкамере в трех точках, температура вдуваемого газа T' — в двух точках: в начале и в конце внутреннего канала пористой трубки (рис. 2, б). Кроме того, регистрируется

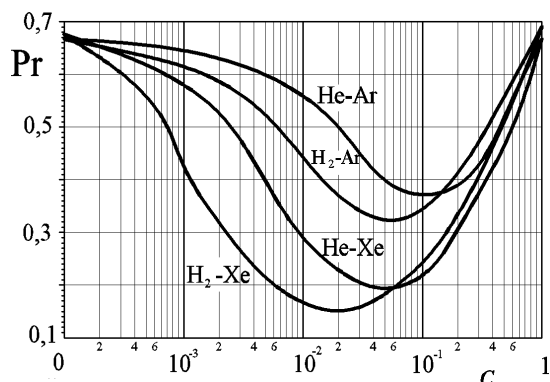


Рис. 1. Число Прандтля газовой смеси в зависимости от массовой концентрации легкого газа в смеси

температура вдуваемого газа перед расходомерной шайбой. Все указанные температуры измеряются хромель-копелевыми термопарами. Массовый расход вдуваемого газа определяется при помощи тарированных расходомерных шайб критического перепада, которые устанавливаются в специально сконструированном расходомерном устройстве (рис. 3).

Массовый расход основного потока определяется по параметрам торможения, измеренным в форкамере, и по площади критического сечения кольцевого сверхзвукового канала. Электрические сигналы, получаемые от термопар и датчиков абсолютного давления, преобразовываются в многоканальном аналого-цифровом модуле National Instruments USB-6255. Далее через USB порт поступают в ПЭВМ. В ПЭВМ в программной среде LabView 7.1 создана программа для обработки, сбора, отображения и сохранения измеряемых величин на жестком диске.

Использование инфракрасного оборудования (тепловизор ThermaCAM SC3000) позволяет получать температурные поля T_w части поверхности модели (проницаемой и следующей за ней непроницаемой), видимой через смотровое окно, закрытое инфракрасным экраном. При этом не нарушается герметичность сверхзвукового канала. Данная система работает в инфракрасной области электромагнитного спектра излучения на длинах волн от 8 мкм до 9 мкм в диапазоне температур от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для измерения температуры на реальных объектах в тепловизоре предусмотрена возможность задания значения коэффициента излучения объекта. Кадр содержит 320×240 точек, разрешающая способность по температуре $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ при $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Угол поля зрения используемого в работе объектива $20 \times 15^{\circ}$. Фиксируемые изображения анализируются с помощью программы TermaCAM Researcher Pro 2.7.

Абсолютная погрешность измерения температуры поверхности модели при данных условиях проведения эксперимента составила $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная погрешность измерения давления датчиками ИКД — $\pm 0.5\%$, а абсолютная погрешность измерения температуры термопарами — $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика проведения исследования

Экспериментальные исследования проводились следующим образом. Вначале на установку подавался аргон — газ основного потока. При помощи нагревателя устанавливалась необходимая температура торможения основного потока T_o . Достигалось установившееся стационарное течение основного потока в сверхзвуковом канале, которое контролировалось по показаниям датчиков давления и по картине температурного поля модели, наблюдаемой через тепловизор. Данные (P_o, P_i, T_o, T_w), соответствующие стационарному режиму, измерялись и записывались. Измеренная таким образом температура (без вдува) поверхности модели T_w принималась за температуру адиабатной непроницаемой стенки T_{ad}^* . Далее на установку подавался вдуваемый газ. Давление и температура перед расходомерной шайбой регулировались при помощи дросселя и нагревателя. Таким образом достигался необходимый расход вдуваемого газа, при этом параметры торможения основного потока (P_o, T_o) поддерживались неизменными. В течение эксперимента с интервалом в одну секунду проводилась регистрация измеряемых величин ($P_o, P_i, T_o, T_w, T_i', P_i'$, температура и давление перед расходомерной шайбой). При этом температура T_w , фиксируемая тепловизором, является искомой температурой поверхности проницаемого и непроницаемого элементов модели, которая устанавливается в результате теплообмена между вдуваемым газом и газом основного потока, в случаях как однородного, так и инородного вдува.

Статическое давление, приведенное на всех последующих рисунках, является безразмерной величиной. Размерные значения отнесены к давлению торможения, измеренному в форкамере. Гидравлический диаметр D_h принимается

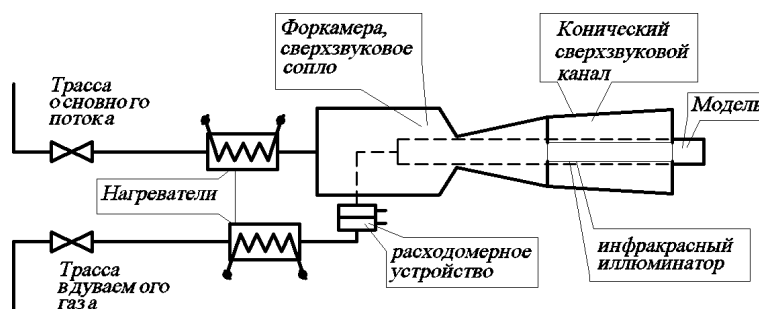


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

постоянным и равным 5.6 мм в начальном сечении конического насадка с установленной моделью. Для определения интенсивности вдува j_w полный расход газа через пористый элемент делится на площадь внешней поверхности проникаемого элемента. Массовая скорость j_o определяется как отношение расхода основного потока к площади поперечного сечения кольцевого канала, где начинается проникаемый элемент.

Результаты

Сверхзвуковое течение аргона без вдува

На рис. 4 приведено распределение статического давления вдоль конического канала при сверхзвуковом течении аргона без вдува. Распределение давления по длине канала имеет немонотонный характер, что свидетельствует о наличии в сверхзвуковом потоке волн сжатия (косых скачков уплотнения).

На рис. 5 показано распределение температуры поверхности модели, измеренной тепловизором. Это значение принимается за адиабатную температуру стенки на непроницаемой поверхности T_{ad}^* . В месте соединения пористого и непроницаемого участков модели температура уменьшается на $\approx 2.5^\circ\text{C}$, что, по-видимому, связано с циркуляцией рабочего тела во внутреннем канале пористой трубки. Как видно из рис. 4, давление газа внутри пористой трубки в сечении с координатой 10.3 немного меньше, чем статическое давление в том же сечении в сверхзвуковом канале, а в сечении с координатой 0.7, напротив, давление внутри трубки чуть больше, чем в сверхзвуковом канале. Следовательно, аргон

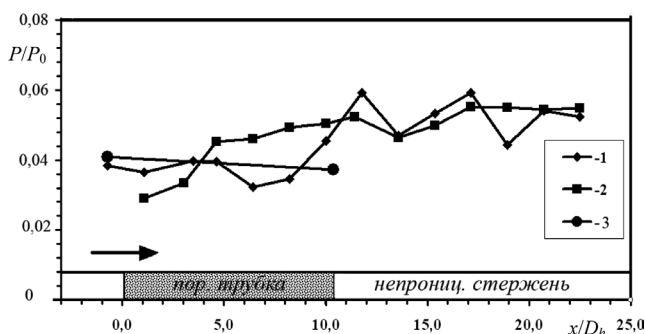


Рис. 4. Распределение статического давления при течении сверхзвукового потока аргона в коническом канале с установленной моделью, без вдува, $P_0 = 0.882 \pm 0.004$ МПа, $Re_1 = 37.6 \cdot 10^6$. 1 — левая сторона, 2 — правая сторона, 3 — статическое давление внутри пористой трубки

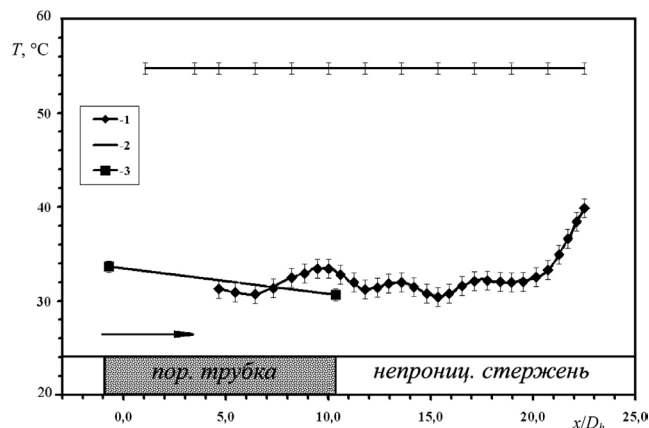


Рис. 5. Распределение температуры при течении сверхзвукового потока аргона в коническом канале с установленной моделью, без вдува. 1 — адиабатная температура стенки без вдува T_{ad}^* , 2 — температура торможения основного потока T_o , 3 — температура во внутреннем канале пористой трубки T'

гон отсасывается из основного потока в конце пористого участка и вдувается в его начале. Известно [1], что при одних и тех же параметрах основного потока отсос увеличивает величину адиабатной температуры стенки, а вдув снижает. Возможно, этим объясняется отличие температуры поверхности пористой трубки от температуры поверхности следующего за ней непроницаемого участка модели. На непроницаемом участке адиабатная температура стенки на протяжении ≈ 10 калибров практически постоянна, что свидетельствует об отсутствии в сверхзвуковом потоке волн сжатия высокой интенсивности. Если бы происходило существенное торможение сверхзвукового потока в волнах сжатия, то адиабатная температура стенки должна была бы увеличиваться, стремясь к температуре торможения потока, которую в данном случае (отсутствие теплообмена между газом основного потока и окружающей средой) можно принимать практически постоянной по длине канала.

Течение сверхзвукового потока аргона при вдуве гелия и аргона

На рис. 6 приведено распределение статического давления вдоль конического канала при течении сверхзвукового потока аргона и вдуве гелия через пористый участок модели. Относительная интенсивность вдува составляла $j = 0.00073 \pm 3 \cdot 10^{-5}$. Как видно, вдув гелия в сверхзвуковой поток аргона оказывает влияние на распределение статического давления, которое становится более неравномерным, чем в случае от-

сутствия вдува. Это свидетельствует о том, что основной сверхзвуковой поток испытывает существенное торможение в скачках уплотнения. Следует уделить особое внимание вопросу о влиянии скачков уплотнения на температуру поверхности в области газовой завесы. По данным работ [5, 6] наличие возмущений в основном потоке, таких как косые скачки уплотнения, приводит к снижению эффективности газовой завесы и, следовательно, к снижению разности между температурой стенки в области газовой завесы T_w и адиабатной температурой непроницаемой стенки T_{ad}^* . Эти эффекты можно объяснить более интенсивным смешением вдуваемого газа с основным потоком в области взаимодействия сверхзвукового пограничного слоя с падающим скачком уплотнения. Таким образом, увеличение неравномерности в профиле статического давления при вдуве гелия может свидетельствовать о наличии в потоке скачков уплотнения более высокой интенсивности, чем в случае без вдува. Это, в свою очередь, должно приводить к более существенному росту, а не к уменьшению T_w , т.е. отрицательно влиять на исследуемый нами эффект. Однако, как видно из рис. 7 (за пористым участком на непроницаемой стенке, т.е. в области газовой завесы), несмотря на наличие скачков уплотнения, T_w меньше на $\approx 12^\circ\text{C}$ температуры поверхности пористой стенки. В нашем случае температура вдуваемого газа T' в конце пористого участка практически равна адиабатной температуре стенки пористой поверхности, ко-

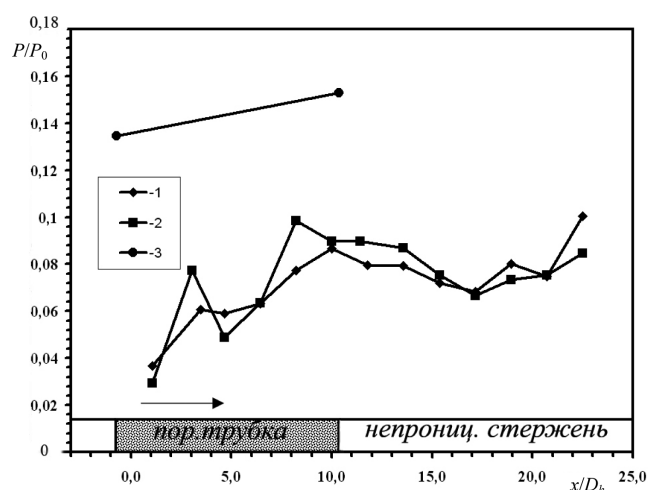


Рис. 6. Распределение статического давления при течении сверхзвукового потока аргона в коническом канале с установленной моделью и вдуве гелия, $P_0 = 0.837 \pm 0.004$ МПа, $Re_1 = 37.6 \cdot 10^6$. 1 — левая сторона, 2 — правая сторона, 3 — статическое давление внутри пористой трубки

торая измерялась при идентичных условиях в форкамере, но при отсутствии вдува. Полученный результат качественно подтверждает наличие механизма интенсификации переноса тепла из пристенных слоев в основной поток при вдуве легкого инородного газа. Более подробно данный эффект обсуждается ниже.

С целью сравнения распределений статического давления и распределений температуры поверхности модели по длине канала при однородном и неоднородном вдуве проводились измерения давления и T_w при однородном вдуве «аргона в аргон» (рис. 8 и 9). Сравнение проводилось при одинаковых значениях параметров основного потока в форкамере P_0 и T_0 . Температура вдуваемого аргона перед расходомерной шайбой $\approx 22^\circ\text{C}$, относительная интенсивность вдува $j = 0.00073 \pm 3 \cdot 10^{-5}$, как и при вдуве гелия.

В результате проведенных экспериментов отмечено, что при идентичных по температуре перед расходомерной шайбой режимах вдува температура вдуваемого аргона в начале пористого участка оказалась на $\approx 10^\circ\text{C}$ выше температуры вдуваемого гелия и практически не менялась по длине пористого элемента. В данном случае не наблюдалось значительного снижения температуры стенки в области газовой завесы, как это происходило при вдуве гелия, и в пределах точности экспериментального исследования она оставалась практически равной адиабатной температуре стенки. Следует отметить, что сравнение режимов инородного и однородного вду-

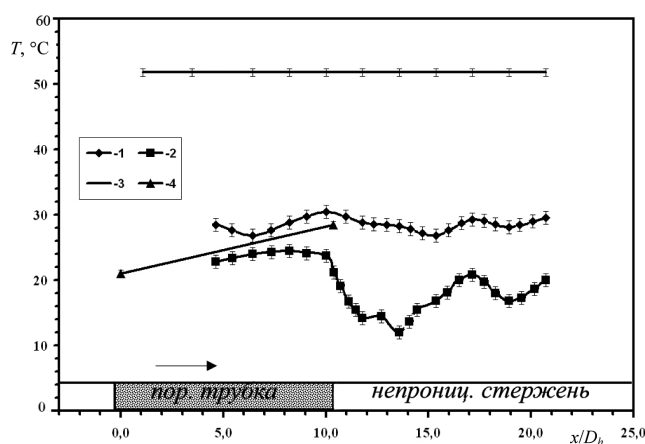


Рис. 7. Распределение температуры при течении сверхзвукового потока аргона в коническом канале с установленной моделью и вдуве гелия. 1 — адиабатная температура стенки без вдува T_{ad}^* , 2 — температура стенки при вдуве гелия T_w , 3 — температура торможения основного потока T_0 , 4 — температура вдуваемого гелия во внутреннем канале пористой трубки T'

ва при одинаковых j не совсем корректно, так как в первом случае режим вдува близок к критическому, а во втором реализуется глубоко докритический режим. Однако результаты, приведенные на рис. 9, наглядно демонстрируют, что явление, зафиксированное при вдуве инородного газа, не наблюдается при вдуве однородного.

Обсуждение полученных результатов

Для пояснения особенностей исследуемого явления следует обратиться к рис. 10, на котором схематично показано изменение температуры поверхности модели, состоящей из пористой проницаемой части и следующего за ней непроницаемого элемента. Модель обтекается сверхзвуковым потоком (число Маха $M > 1$) с темпе-

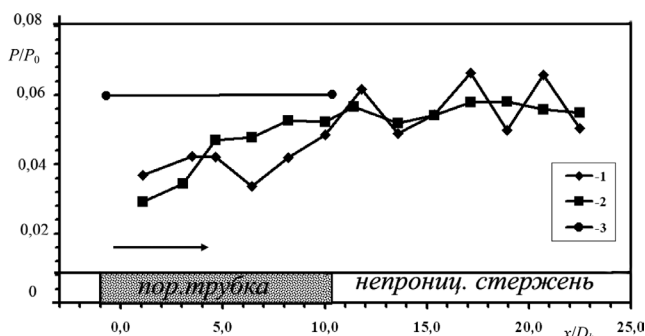


Рис. 8. Распределение статического давления при течении сверхзвукового потока аргона в коническом канале с установленной моделью и вдуве аргона, $P_0 = 0.866 \pm 0.004$ МПа, $Re_1 = 37.6 \cdot 10^6$. 1 — левая сторона, 2 — правая сторона, 3 — статическое давление внутри пористой трубки

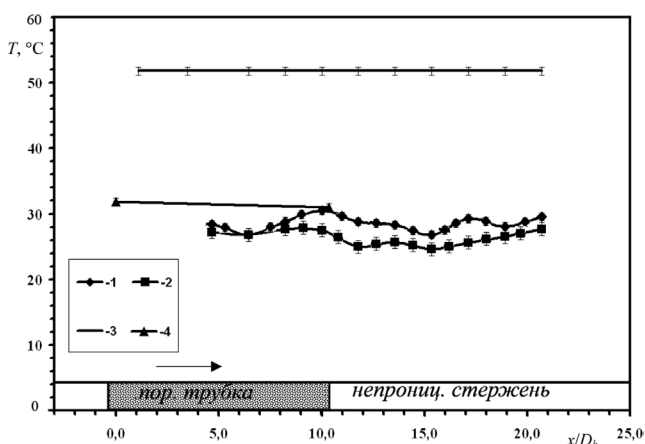


Рис. 9. Распределение температуры при течении сверхзвукового потока аргона в коническом канале с установленной моделью и вдуве аргона. 1 — адиабатная температура стенки без вдува T_{ad}^* , 2 — температура стенки при вдуве аргона T_w , 3 — температура торможения основного потока T_0 , 4 — температура вдуваемого аргона во внутреннем канале пористой трубки T'

ратурой торможения T_0 и массовой скоростью $j_0 = (\rho \cdot u)_0$. Через пористый элемент вдувается газ с температурой T' и постоянной по длине пористого элемента интенсивностью вдува $j_w = (\rho \cdot w)_w$. Режим вдува является докритическим, принимается однотемпературная модель, т.е. температура стенки проницаемой модели равна температуре вдуваемого газа, проходящего через стенку в данной точке. Эффект термодиффузии принимается пренебрежимо малым. В таком случае определяющими теплообмен температурами являются температура адиабатной непроницаемой стенки T_{ad}^* , температура адиабатной проницаемой стенки $T_{ad.p}^*$ и температура вдуваемого газа T' . Температура адиабатной непроницаемой стенки определяется выражением:

$$T_{ad}^* = T_0 \frac{\left(1 + r_0 \frac{k-1}{2} M^2\right)}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)}, \quad (1)$$

где $r_0 = \sqrt[3]{Pr}$ — коэффициент восстановления температуры на плоской непроницаемой поверхности при турбулентном пограничном слое, Pr — число Прандтля, k — показатель адиабаты, M — число Маха набегающего потока. Температуру адиабатной проницаемой стенки можно рассчитать по соотношению:

$$T_{ad.p}^* = T_0 \frac{\left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2\right)}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)}, \quad (2)$$

где $r = r_0(1 - 0.04b_M)$ — коэффициент восстановления температуры на проницаемой поверхности при вдуве через нее газа [7]. Этот коэффициент зависит от параметра проницаемости $b_M = \frac{j_w}{j_0} \frac{1}{St_M}$, в котором число Стантона St_M определяется в виде [1]

$$St_M = \frac{1}{2} \frac{C_{fM}}{Pr^{3/4}}, \quad C_{fM} = C_{f0}(1 + 0.2M^2)^{-0.6}, \\ C_{f0} = 0.0576 Re_x^{-0.2}.$$

Здесь C_{fM} — коэффициент сопротивления при отсутствии вдува ($j_w = 0$), но при $M = idem$, $Re_x = idem$; Pr — число Прандтля, определенное по температуре стенки T_w ; $Re_x = (\rho u)_0 x / \eta$ — число Рейнольдса по длине, отсчитываемой от на-

чала вдува, при значениях теплофизических свойств, определенных по температуре и давлению в набегающем потоке. Как видно из (2), при отсутствии вдува ($j_w = 0$) $T_{ad.p}^* = T_{ad}^*$. Также очевидно, что при одинаковых параметрах основного потока и параметре проницаемости $T_{ad.p}^*$ зависит только от критерия Прандтля.

Рассмотрим, как изменяется температура поверхности модели T_w , состоящей из проницаемой и непроницаемой стенки, при вдуве однородного газа в сверхзвуковой пограничный слой. При постоянных по длине проницаемого элемента интенсивности вдува $j_w = \text{const}$ и числе Маха $M = \text{const}$ температура адиабатной проницаемой стенки $T_{ad.p}^*$ снижается с ростом продольной координаты, так как число Re_x растет и, следовательно, растет b_M . Удельный тепловой поток в проницаемую стенку определяется как $q_w = \alpha(T_{ad.p}^* - T_w)$, где α —

коэффициент теплоотдачи от газа к стенке, этот же тепловой поток воспринимается вдуваемым газом $q_w = j_w C_p (T_w - T')$, где C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении. Следовательно, величина T_w на поверхности проницаемой стенки лежит в интервале между T' и $T_{ad.p}^*$. На рис. 10, а сплошными линиями показана величина T_{wi} ($i = 1—4$) для разных значений температур вдуваемого газа T'_i , причем $T'_1 < T'_2 < T'_3 < T'_4 = T_0$. При этом температура непроницаемой стенки в области газовой завесы T_{wi} монотонно возрастает от значений T_{wi} в конце проницаемого участка до температуры адиабатной непроницаемой стенки T_{ad}^* на некотором удалении от проницаемой стенки, где влияние газовой завесы исчезает за счет турбулентного перемешивания вдуваемого газа с газом основного потока, что подробно исследовано в [8]. Таким образом, минимальная температура поверхности при вдуве охлаждающего

газа ($T' \leq T_{ad}^*$) достигается на проницаемой поверхности, следовательно, в этой области эффективность охлаждения поверхности максимальна.

При вдуве инородного газа (гелия в аргон) изменяется массовая концентрация с легкой компоненты (гелия) в пристенном слое. Соответственно изменяется число Прандтля смеси в этом слое (рис. 1 и рис. 10, б.) Это изменение в свою очередь ведет к уменьшению величины коэффициента восстановления на проницаемой поверхности r по сравнению со значениями при однородном вдуве, что приводит к снижению адиабатной температуры проницаемой стенки. При этом характер изменения температуры поверхности пористой стенки T_{wi} не изменяется, ее величина на проницаемой поверхности остается в интервале между T'_i и $T_{ad.p}^*$ (показано на рис. 10, а штрихпунктирными линиями). Однако в области газовой завесы картина качественно изменяется, так как за счет перемешивания вдуваемого газа и газа основного потока концентрация легкого компонента на стенке начинает падать от значения в конце пористого участка до нуля на некотором удалении. Следовательно, распределение числа Прандтля по длине в пристенной обла-

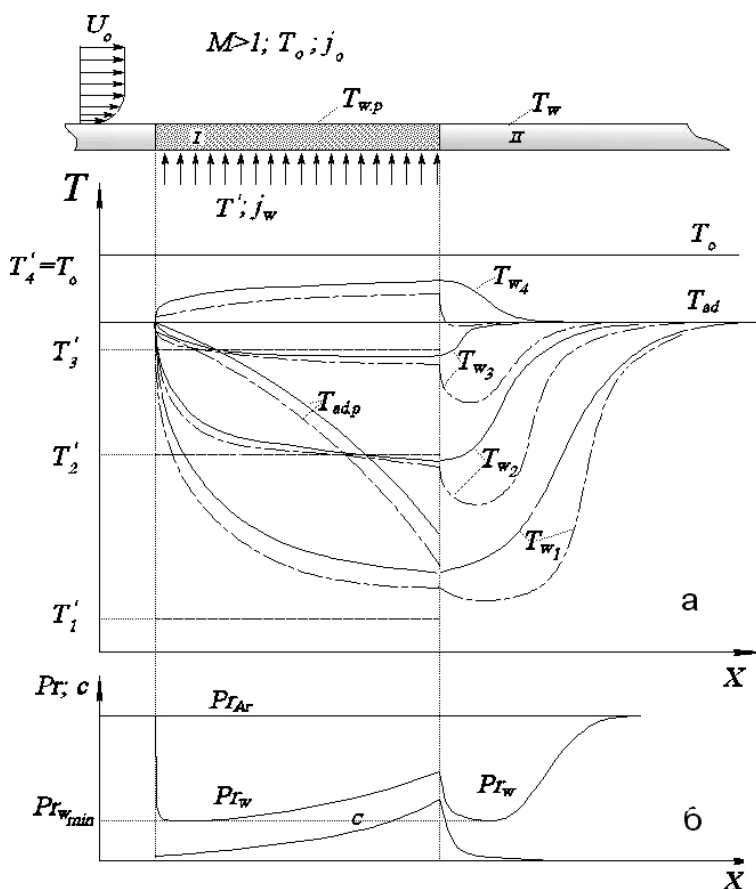


Рис. 10. Изменение температуры проницаемой поверхности и непроницаемой поверхности в области газовой завесы T_w при вдуве однородного (сплошные линии) и инородного (штрихпунктирные линии) газа в сверхзвуковой пограничный слой при различных значениях температуры вдуваемого газа T'_i (а) и изменение числа Прандтля смеси Pr_w в пристенной области в зависимости от массовой концентрации легкого компонента инородного газа — с по [4] (б). Pr_{Ar} — число Прандтля аргона

сти проходит через минимальное значение. Поэтому можно ожидать, что температура стенки в области газовой завесы будет существенно ниже температуры поверхности проницаемой стенки и, следовательно, максимальная эффективность охлаждения переместится в область газовой завесы. Как показано в [3], наиболее значительно данный эффект проявляется при температуре вдуваемого газа, близкой к адиабатной температуре непроницаемой стенки.

В проведенном экспериментальном исследовании число Маха и интенсивность вдува j_w менялись вдоль длины проницаемого участка. Однако даже в этом случае при однородном вдуве участок с минимальной температурой стенки будет находиться на проницаемой поверхности, а не в области газовой завесы, что следует из тех же соображений, которые приведены для случая постоянной интенсивности вдува. При переменных числе Маха и интенсивности вдува по длине, но в случае неоднородного вдува, область минимальной температуры стенки может находиться как на проницаемой поверхности, так и на непроницаемой — в области газовой завесы. Именно получение режима, при котором область с минимальной температурой стенки находится на непроницаемом участке в области газовой завесы, позволяет сделать вывод о влиянии критерия Прандтля смеси на температуру стенки.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование влияния вдува легкого газа в сверхзвуковой пограничный слой тяжелого газа на эффективность газовой завесы. Получено, что при вдуве гелия с температурой, практически равной адиабатной температуре непроницаемой стенки, существуют зоны в области газовой завесы, где температура стенки меньше, чем температура вдуваемого газа. Данный результат качественно подтверждает выводы [3] о влиянии критерия Прандтля смеси, образующейся в пристенной области при вдуве легкого газа, на величину температуры стенки в области газовой завесы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- b_M — параметр проницаемости;
 C_f — коэффициент сопротивления;
 C_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

- c — массовая концентрация легкого компонента смеси;
 D_h — гидравлический диаметр, мм;
 k — показатель адиабаты;
 M — число Маха;
 P — статическое давление, Н/м²;
 P_o — давление торможения, Н/м²;
 P' — давление вдуваемого газа, Н/м²;
 r_o — коэффициент восстановления температуры на непроницаемой поверхности;
 r — коэффициент восстановления температуры на проницаемой поверхности;
 T' — температура вдуваемого газа, °С;
 T_o — температура торможения основного потока, °С;
 T_{ad}^* — адиабатная температура стенки, °С;
 $T_{ad,p}^*$ — температура адиабатной проницаемой стенки, °С;
 T_w — температура поверхности модели, °С;
 u, w — проекции вектора скорости на координаты x и y ; м/с;
 x — продольная координата, мм;
 $j_o = (\rho \cdot u)_o$ — массовая скорость основного потока, кг/(м²·с);
 $j_w = (\rho \cdot w)_w$ — интенсивность вдува, кг/(м²·с);
 $j = (\rho \cdot w)_w / (\rho \cdot u)_o$ — относительная интенсивность вдува;
 Re_1 — число Рейнольдса на единицу длины, 1/м;
 Pr — число Прандтля;
 α — коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·К)
 ρ — плотность, кг/м³;
 η — динамическая вязкость газа, Па·с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергия, 1985. 320 с.
- Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
- Леонтьев А.И., Лушик В.Г., Якубенко А.Е. Особенности теплообмена в области газовой завесы при вдуве однородного газа // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 4. С. 52—59.
- Здитовец А.Г., Титов А.А., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М., Медвежская Н.В. Экспериментальное исследование влияния вдува инородного газа (гелий) в сверхзвуковой поток аргона на температуру адиабатической стенки // Тепловые процессы в технике. 2010. Т. 2. № 4. С. 159—164.
- Juhany K.A., Hunt M.L. Flowfield Measurement in Supersonic Film Cooling Including the Effect of Shock-Wave Interaction // AIAA Journal. 1994. V. 32. N 3. P. 578—585.
- Kanda T., Ono F., Saito T. Experimental Studies of Supersonic Film Cooling with Shock Wave Interaction // AIAA. 1996. Paper 96—2663.
- Леонтьев А.И., Лушик В.Г., Якубенко А.Е. Температура теплоизолированной проницаемой стенки в потоке сжижаемого газа // Изв. РАН. МЖГ. 2008. № 5. С. 144—152.
- Барышев Ю.В., Виноградов Ю.А., Леонтьев А.И., Рождественский В.И. Коэффициенты восстановления на проницаемой поверхности и в области газовой завесы в сверхзвуковом турбулентном пограничном слое // Изв. АН СССР МЖГ. 1972. № 2. С. 131—136.