

УДК 533.6.011.6

## ИЗМЕРЕНИЕ АДИАБАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕНКИ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ, ОБТЕКАЕМОЙ СВЕРХЗВУКОВЫМ ВОЗДУШНО-КАПЕЛЬНЫМ ПОТОКОМ

© 2020 г. Ю. А. Виноградов<sup>а</sup>, А. Г. Здитовец<sup>а</sup>, Н. А. Киселев<sup>а</sup>,  
Н. В. Медвецкая<sup>б</sup>, С. С. Попович<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

\*E-mail: pss@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 24.01.2020 г.

После доработки 12.03.2020 г.

Принята к публикации 12.03.2020 г.

Представлены результаты измерения температуры поверхности плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым воздушно-капельным потоком. Пластина из дюралюминия устанавливалась вертикально в рабочем канале аэродинамической установки. Капли жидкости (дистиллированная вода) в воздушный поток распылялись в форкамере через центробежные форсунки. Массовая концентрация жидкости составляла  $\approx 0.36$ ,  $0.27\%$  средний диаметр капель по Заутеру —  $\approx 110$  мкм, число Маха набегающего потока  $M = 2.5, 3.0$ . Температура поверхности измерялась тепловизором. Результаты измерений температуры поверхности пластины для случая однофазного (без капель) воздушного потока сравнивались с результатами для воздушно-капельного потока при одинаковых параметрах (по воздуху) в форкамере. Также для интенсификации осаждения капель жидкости на пластину использовался генератор скачка уплотнения в виде клина, установленного вертикально перед пластиной.

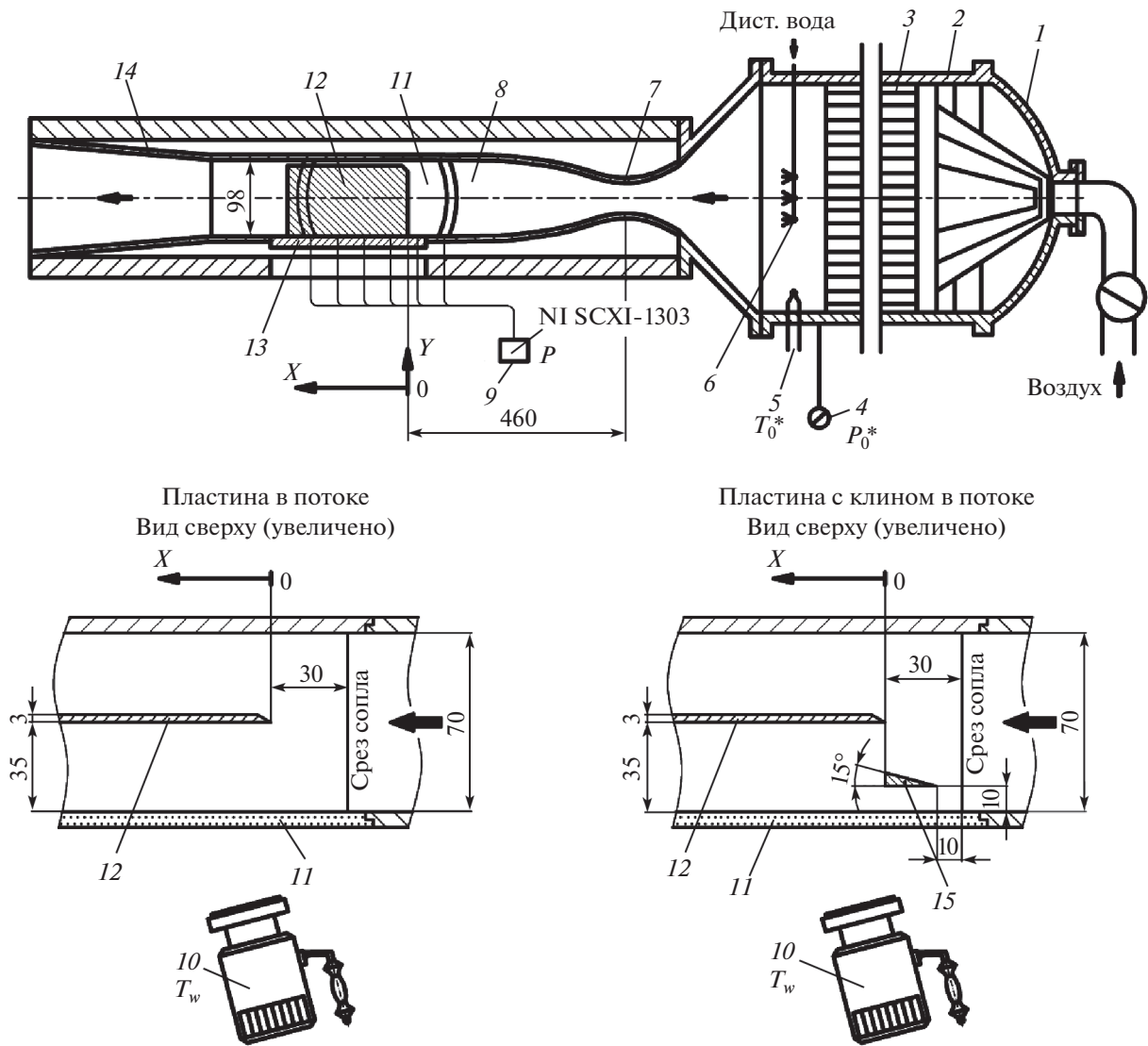
**Ключевые слова:** сверхзвуковой газочапельный поток, дисперсные газовые потоки, адиабатная температура стенки

**DOI:** 10.31857/S056852812005014X

Исследованию взаимодействия двухфазных (дисперсных) потоков с обтекаемыми телами посвящено множество работ (см., например, обзор [1]). Наличие даже небольшого количества примеси (доли процента) в основном потоке может приводить к существенным изменениям его параметров на поверхности обтекаемого тела. В данной работе внимание сконцентрировано на влиянии примеси водных капель в сверхзвуковом воздушном потоке на температуру поверхности обтекаемого тела.

Известно, что чем больше число Маха потока, тем больше его термодинамическая температура  $T$  отличается от температуры адиабатического торможения  $T_0^*$ . Например, при звуковой скорости течения воздушного потока это отличие  $(T_0^* - T)/T_0^*$  составляет  $17\%$ , а при числе Маха  $3-65\%$ . При этом газ непосредственно на адиабатной (непроницаемой для теплового потока) поверхности принимает температуру  $T_{aw}$ , отличную как от температуры торможения набегающего потока, так и от его термодинамической температуры. В отечественной научной литературе используется несколько равнозначных терминов для ее обозначения: адиабатная температура стенки, температура восстановления, собственная температура стенки, температура теплоизолированной стенки, равновесная температура стенки. В настоящей работе будем называть ее адиабатной температурой стенки, как рекомендовано в работе [2]. Адиабатная температура стенки определяется выражением [3]

$$T_{aw} = T_0^* \left( 1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{-1} \approx \begin{cases} T_0^*, & M \ll 1 \\ r \cdot T_0^*, & M \gg 1 \end{cases} \quad (1)$$

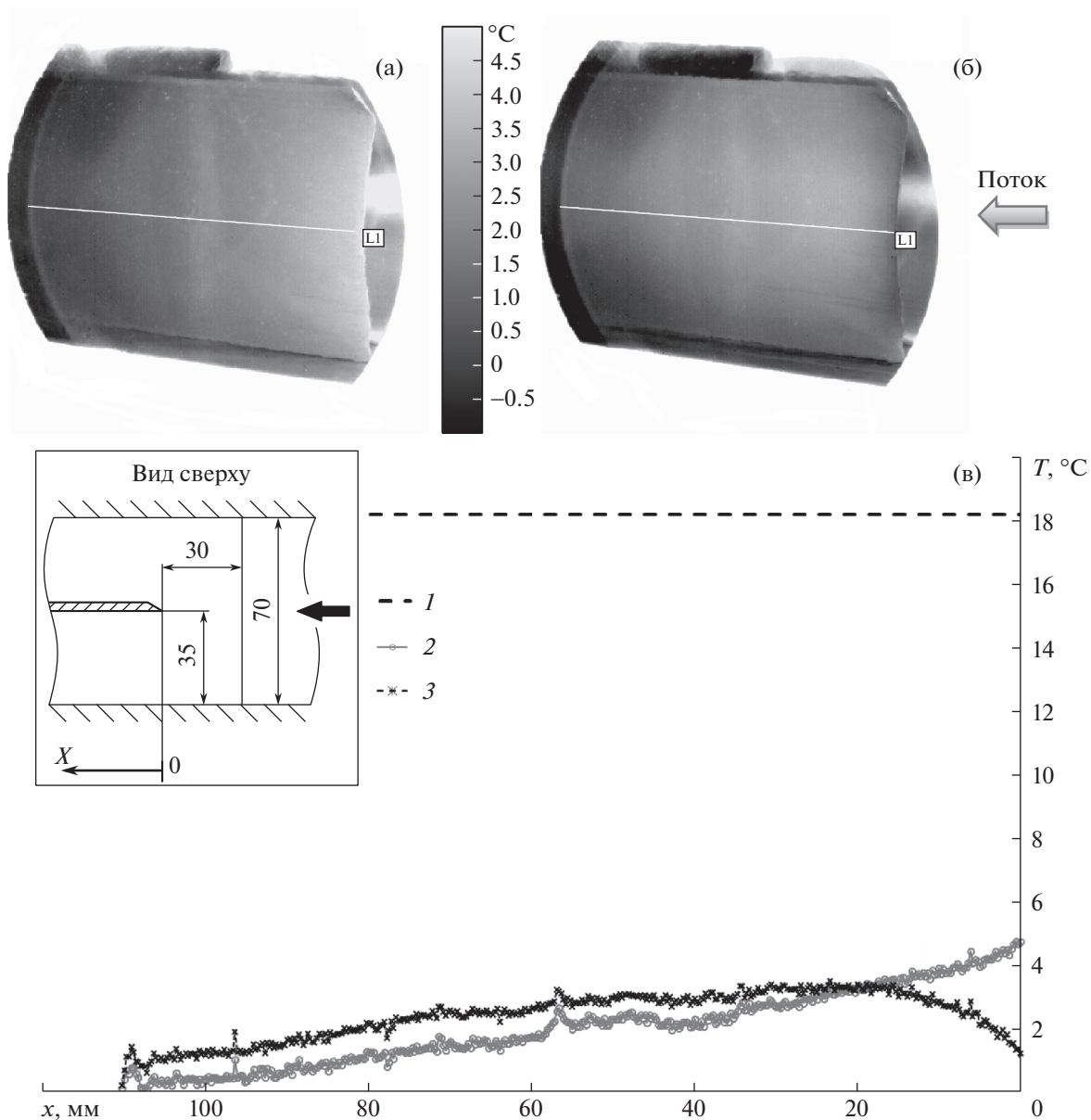


**Рис. 1.** Схема сверхзвукового экспериментального стенда: 1 — форкамера; 2 — сборка конусов; 3 — хонейкомб (спрямляющая решетка); 4, 5 — датчики для измерения давления и температуры торможения; 6 — набор центральных форсунок; 7 — плоское регулируемое сопло; 8 — рабочий канал; 9 — датчики статического давления и термопары; 10 — ИК-камера; 11 — иллюминатор; 12 — экспериментальная модель; 13 — пластина из оргстекла; 14 — диффузор; 15 — клин — генератор скачка уплотнения.

где  $T_{aw}$  — адиабатная температура стенки, К;  $T_0^*$  — температура торможения в основном потоке, К;  $M$  — число Маха;  $\gamma$  — показатель адиабаты газа;  $r$  — коэффициент восстановления температуры. Величина  $r$  зависит от многих факторов, но, как показали многочисленные экспериментальные и численные исследования [3, 4], при турбулентном безотрывном обтекании пластины и тел вращения с гладкими образующими (цилиндр, конус) однофазным потоком с числом Прандтля  $Pr \approx 0.7$ ,  $r = 0.89 \pm 0.01$ .

Тогда из (1), для воздуха ( $Pr \approx 0.7$ ) при  $M = 1$  величина  $(T_0^* - T_{aw})/T_0^*$  составляет  $\approx 2\%$ , а при числе Маха 3 —  $\approx 7\%$ , т.е. она фактически близка к  $T_0^*$ , а не к  $T$ , следовательно, далека от минимальной температуры в обтекаемом потоке.

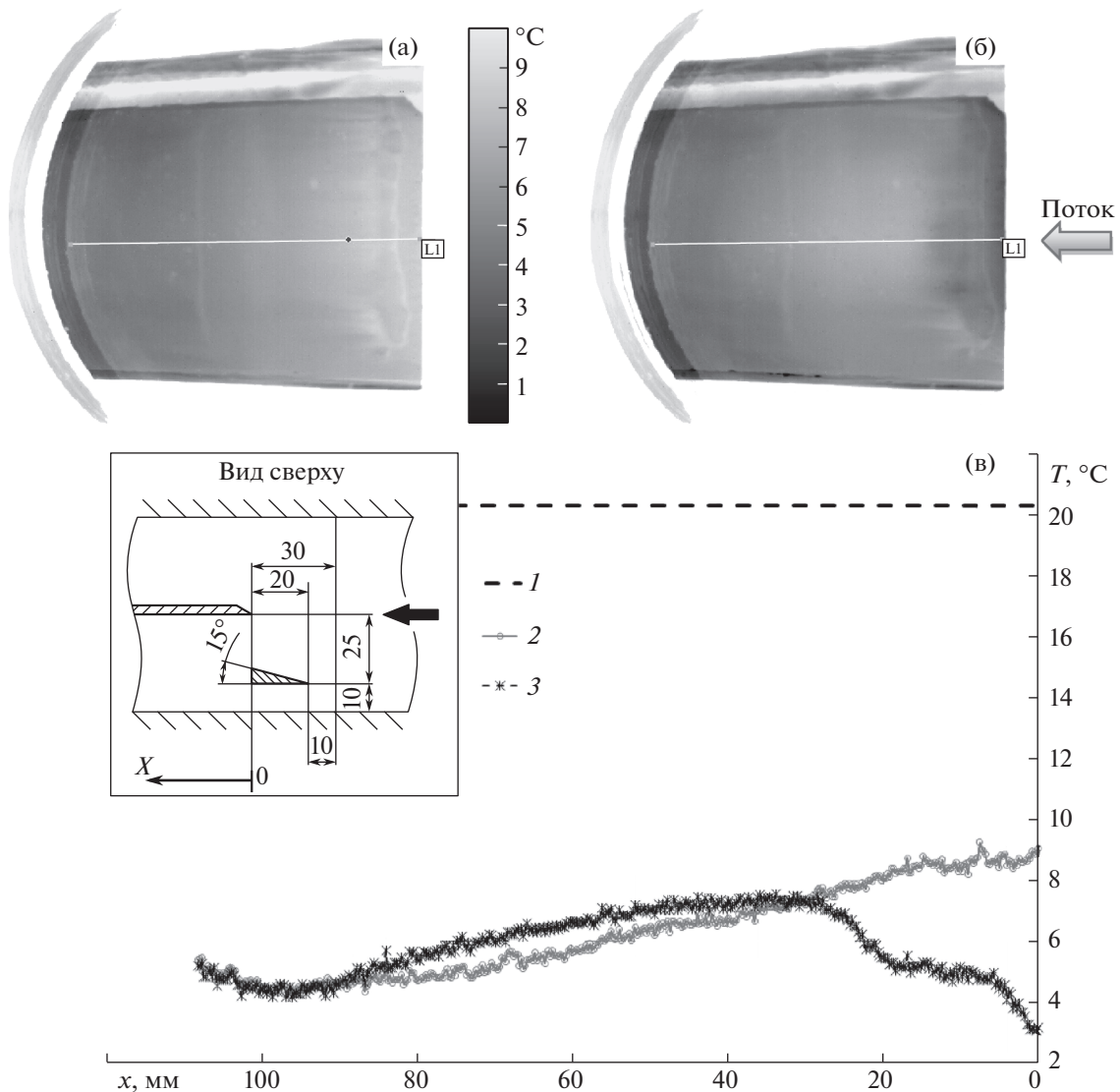
Во многих прикладных задачах (теплозащита, безмашинное энергоразделение и т.п.) снижение адиабатной температуры стенки относительно температуры торможения приводит к существенному повышению положительного эффекта [5–11]. Например, данное обстоятельство мо-



**Рис. 2.** Термограммы поверхности пластины, обтекаемой воздушным потоком (а) и воздушно-капельным потоком (б); распределения адиабатной температуры стенки по центру пластины при двух режимах обтекания (в):  $T_0^* = 18.3^\circ\text{C}$ ,  $M = 3.0$ ,  $m = 0.36\%$ ; 1 – температура торможения  $T_0^*$ , 2 – однофазный воздушный поток, 3 – воздушно-капельный поток.

жет использоваться для повышения эффективности устройств без машинного энергоразделения, работающих по схеме, предложенной в работе [5].

В работах [12, 13] экспериментально показано, что при расширении в сопле влажного водяного пара (пар с каплями воды влажностью до 4.5%) температура адиабатной стенки сопла снижается по сравнению с течением перегретого пара. В [12] коэффициент восстановления принимал значение  $r = 0.7$  во влажном паре, и  $r = 0.9\text{--}0.8$  в перегретом паре в зависимости от начальной степени перегрева. В [13] показано, что адиабатная температура стенки зависит как от начальной влажности, так и от начальной дисперсности капель. При размерах капель  $d > 70$  мкм и начальной влажности  $m > 2\%$  капли выпадали на стенку и образовывали пленку жидкости с температурой, равной температуре насыщения.



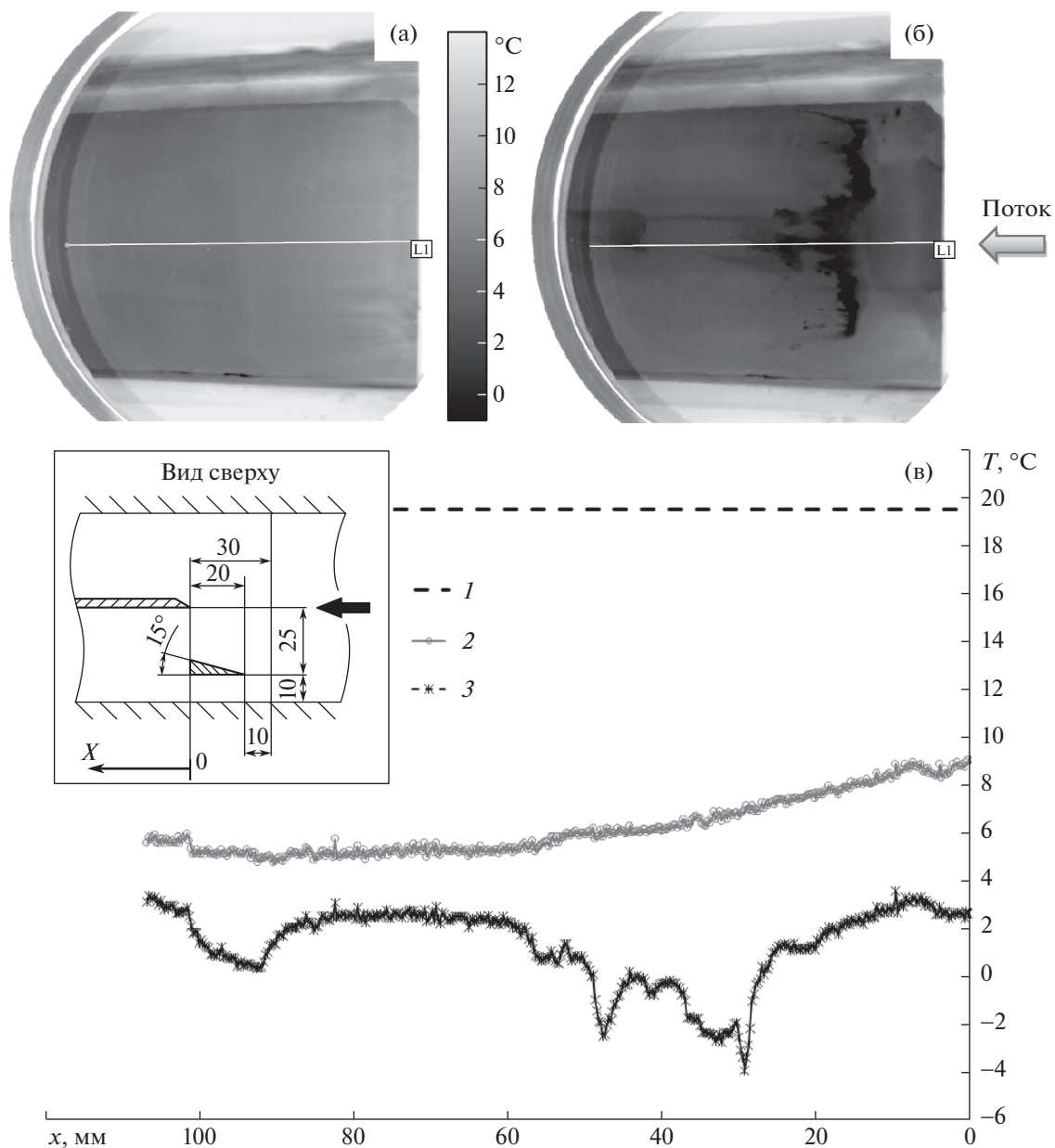
**Рис. 3.** Термограммы поверхности пластины, обтекаемой воздушным потоком (а) и воздушно-капельным потоком (б); распределения адиабатной температуры стенки по центру пластины при двух режимах обтекания (в):  $T_0^* = 20.5^\circ\text{C}$ ,  $M = 3.0$ ,  $m = 0.36\%$ ; 1 – температура торможения  $T_0^*$ , 2 – однофазный воздушный поток, 3 – воздушно-капельный поток.

В работах [14–16] численно показано, что наличие даже очень малой концентрации (до 3%) капель в основном газовом потоке может приводить к значительному снижению адиабатной температуры стенки обтекаемого тела.

В настоящей работе проведено измерение температуры адиабатной стенки при обтекании плоской пластины сверхзвуковым однофазным/двухфазным потоком при наличии и отсутствии падающего скачка уплотнения.

## 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на сверхзвуковой установке АР-2, с закрытой рабочей частью и плоским регулируемым сверхзвуковым соплом (рис. 1). Размеры рабочего канала: длина – 450 мм, ширина – 70 мм, высота – 98 мм. Пластина высотой 87 мм, шириной 3 мм и длиной 170 мм из дюралюминия устанавливалась вертикально, вдоль центральной линии рабочего канала на расстоянии 30 мм от среза сопла.



**Рис. 4.** Термограммы поверхности пластины, обтекаемой воздушным потоком (а) и воздушно-капельным потоком (б); распределения адиабатной температуры стенки по центру пластины при двух режимах обтекания (в):  $T_0^* = 19^\circ\text{C}$ ,  $M = 2.5$ ,  $m = 0.27\%$ ; 1 – температура торможения  $T_0^*$ , 2 – однофазный воздушный поток, 3 – воздушно-капельный поток.

Установка оснащена как оптическими окнами, так и инфракрасным иллюминатором из ZnSe, что позволяет фиксировать теневую картину течения с помощью прибора Теплера и температуру нижней и боковой поверхности рабочего канала – с помощью тепловизора InfraTEC 8855 IR. Капли в воздушный поток распылялись в форкамере через пять центробежных форсунок Lechler серии 220.185 с известными характеристиками (распределение диаметра по размерам в зависимости от перепада давления воды на форсунке). Также установка оборудована системой визуализации течения газок капельного потока, состоящей из лазерного ножа и фотоаппаратуры, которая позволяет качественно оценивать структуру потока.

В настоящем исследовании число Маха набегающего потока на срезе сопла составляло 2.5, 3.0. Массовая концентрация воды  $m$  – 0.27 и 0.36% соответственно. Согласно представленной

производителем форсунок характеристике, средний диаметр Заутера (средний объемно-поверхностный диаметр частиц) для впрыскиваемых капель составлял 110 мкм для перепада давления на форсунках 300 кПа. Производились измерения температуры поверхности нижней стенки канала и боковой поверхности пластины. Данная температура принималось равной адиабатной температуре стенки. Результаты измерений для воздушного однофазного потока сравнивались с результатами для воздушно-капельного потока при одинаковых параметрах (по воздуху) в фор-камере. Температура впрыскиваемых капель была близка (в пределах 2 °С) к температуре торможения воздушного потока. Также проведена серия экспериментов, в которых для интенсификации осаждения капель на поверхность пластины использовался генератор скачка уплотнения в виде клина, установленного вертикально перед пластиной.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведены термограммы поверхности пластины при обтекании воздушным (рис. 2а) и воздушно-капельным потоком (рис. 2б) при  $m = 0.36\%$ . Число Маха на срезе сопла  $M = 3.0$ . При добавлении капель в поток температура кромки пластины снижалась на 4°С и далее на расстоянии 18 мм восстанавливалась до значений, полученных в случае однофазного потока (рис. 2в).

Расположение генератора скачка уплотнения перед пластиной (рис. 3) при том же числе Маха набегающего потока  $M = 3.0$  практически не изменило характер распределения температуры поверхности пластины при обтекании однофазным потоком. Однако в случае воздушно-капельного потока температура кромки пластины уменьшилась на 6°С, и расстояние, на котором температура поверхности восстанавливалась до значений в однофазном потоке, — возросло в 1.5 раза до 28 мм. Более существенное влияние генератор скачка уплотнения оказал на режиме  $M = 2.5$  и  $m = 0.27\%$  (рис. 4). В этом случае происходило выпадение льда в центральной области пластины (темные области рис. 4б), что приводило к локальному снижению температуры поверхности на 10–13°С (на рис. 4в показано распределение температуры по центру пластины).

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты измерения температуры поверхности плоской пластины, обтекаемой сверхзвуковым потоком. Исследовались два режима обтекания. Первый — однофазный поток сухого воздуха, второй — воздушно-капельный поток, состоящий из смеси сухого воздуха и мелкодисперсных водных капель (средний диаметр по Заутеру 110 мкм). При числе Маха  $M = 3$  и массовой концентрации  $m = 0.36\%$  наличие капель привело к небольшому (до 4°С) снижению температуры передней кромки пластины. Далее на расстоянии 18 мм от кромки температура восстанавливалась до значений, полученных при обтекании однофазным потоком. Установка генератора скачка уплотнения перед пластиной увеличила область пластины с пониженной температурой в 1.5 раза. Наибольшего снижения температуры поверхности пластины удалось добиться на режиме  $M = 2.5$  при наличии генератора скачка уплотнения перед пластиной. Из-за увеличения расхода воздуха массовая концентрация воды упала до  $m = 0.27\%$ . В этом случае на поверхности пластины происходило выпадение осадка в виде льда, что приводило к локальному снижению температуры поверхности на 10–13°С по сравнению со случаем обтекания пластины однофазным потоком.

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы АААА-А16-116021110200-5 НИИ механики МГУ при частичной поддержке гранта РФФИ № 17-08-00130.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вараксин А.Ю. Обтекание тел дисперсными газовыми потоками (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 2. С. 282–305.
2. Теория теплообмена. Терминология / Отв. ред. проф., д.т.н. Б.С. Петухов. М., 1967.
3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М: Наука, 1974. 711 с.
4. Лапин Ю.В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М.: Наука, 1970. 344 с.
5. Леонтьев А.И. Газодинамические методы температурной стратификации (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 2002. №4. С. 6–26.
6. Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуковой канал, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 5. С. 134–145.

7. *Leontiev A.I., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A.* Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2017. № 88. P. 202–219.
8. *Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A., Strongin M.M.* Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2019. V. 105. P. 206–215.
9. *Leontiev A.I., Popovich S.S., Vinogradov Y.A., Strongin M.M.* Experimental research of supersonic aerodynamic cooling effect and its application for energy separation efficiency // *Proc. 16th Int. Heat Transfer Conf., IHTC-16*. V. 212244. Beijing, China, 2018. P. 1–8.
10. *Хазов Д.Е.* Численное исследование безмашинного энергоразделения потоков сжимаемого газа // *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 25–36.
11. *Makarov M.S., Makarova S.N.* Efficiency of energy separation at compressible gas flow in a planar duct // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2014. V. 20. № 6. P. 757–767.
12. *Жуковский В.С., Мадиевский В.А., Резникович К.И.* О собственной температуре стенки в потоке перенасыщенного пара // *Теплофизика высоких температур*. 1966. Т. 4. № 3. С. 399–406.
13. *Игнатьевская Л.А.* Исследование двухфазного пограничного слоя на плоской стенке. Дисс. ... к.т.н. МЭИ, 1971.
14. *Леонтьев А.И., Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д.* Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газокapельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53. № 6. С. 910–917.
15. *Азанов Г.М., Осипцов А.Н.* Влияние мелких испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // *Изв. РАН. МЖГ*. 2016. № 4. С. 67–76.
16. *Голубкина И.В., Осипцов А.Н.* Влияние примеси неиспаряющихся капель на структуру течения и температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // *Изв. РАН. МЖГ*. 2019. № 3. С. 58–69.