

ТЕПЛОБМЕН И РАВНОВЕСНАЯ ТЕМПЕРАТУРА ШАРА В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ РАЗРЕЖЕННОГО ГАЗА

Ю. А. КОШМАРОВ, Н. М. ГОРСКАЯ

(Москва)

Приводятся некоторые результаты опытных исследований равновесной температуры и теплообмена шара в сверхзвуковом потоке разреженного воздуха.

Используются обозначения: D — диаметр шара; $u, \rho, T, \mu, l, \lambda$ — параметры невозмущенного потока (u — скорость, ρ — плотность, T — термодинамическая температура, l — средняя длина свободного пробега молекул, μ — коэффициент вязкости, λ — коэффициент теплопроводности); T_0 — температура адиабатно заторможенного потока; T_e — средняя равновесная температура шара; T_w — температура поверхности холодного шара ($T_w < T_e$); α — средний коэффициент теплоотдачи; λ_e — коэффициент теплопроводности воздуха при температуре T_e ; P — число Прандтля; M — число Маха.

$$r = \frac{T_e - T}{T_0 - T}, \quad R = \frac{u\rho D}{\mu}$$

$$K = \frac{l}{D}, \quad t_w = \frac{T_w}{T_0}, \quad N_e = \frac{\alpha D}{\lambda_e}$$

Исследования проводились в вакуумной аэродинамической трубе [1,2]. Рабочие потоки создавались при помощи трех конических сопел. Конструкция и размеры двух из них даны в [3] (фиг. 3 работы [3], сопла 2 и 3). Конструкция третьего сопла аналогична, а размеры составляли: диаметр критического сечения 13 мм, диаметр выходного сечения 33 мм, полный угол раствора сверхзвуковой части сопла 12°. Методика измерений параметров потока описана в [1-3].

Рабочие модели — шары — были изготовлены из электролитической меди. Их конструкция показана на фиг. 1 (1 — медный шар, 2 — державка, 3 — провода термомпар, 4 — стеклянная втулка координатника). Размеры моделей выбирались в соответствии с размерами изоэнтропического ядра течения в сопле.

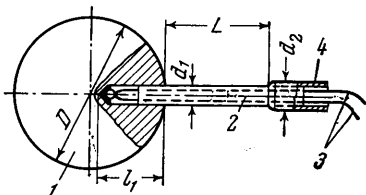
Всего испытывалось четыре модели, для которых:

модели	D , мм	d_1 , мм	l_1 , мм	L , мм	d_2 , мм
1	2.9	0.5	0.8	10	3
2	5.03	0.6	1.5	10	3
3	9.95	1	4	15	4
4	19.75	1	8	25	6

Поверхности шаров были отполированы. В тело каждой модели пайкой были заделаны хромель-копелевые термопары (с диаметром проволоочек 0.1—0.15 мм), которые тарировались после заделки. Провода термопар моделей № 3, 4 отводились по фарфоровой двухканальной сололке, которая выполняла роль державки. Провода термопар моделей № 1, 2 покрывались быстрозастывающим раствором смолы ЭД-5 в полиэтиленополиамине. Застывший раствор совместно с проволочками образовывал жесткую державку.

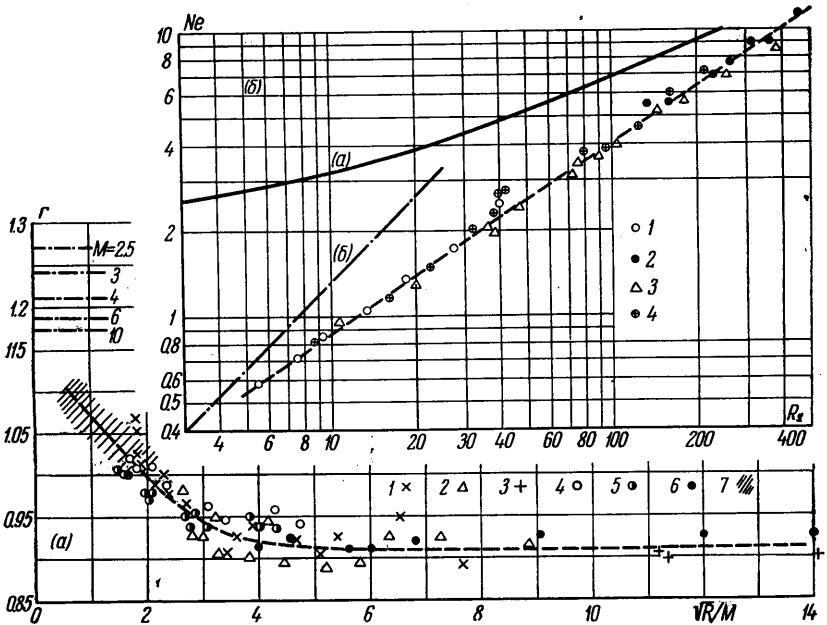
Равновесная температура T_e моделей измерялась стационарным методом. Модель, вставленная в поток, выдерживалась до тех пор, пока ее температура переставала меняться во времени. После этого проводились измерения. Модели можно было считать в условиях, при которых велись опыты, «абсолютно» теплопроводными ($\alpha D / \lambda (\text{Cu}) \leq 10^{-3} - 10^{-4}$, здесь $\lambda (\text{Cu})$ — коэффициент теплопроводности меди). Чтобы обеспечить хорошую точность, все опыты по исследованию коэффициентов восстановления проводились при температуре торможения, равной комнатной (воздух к соплу поступал из помещения, где находилась барокамера). При этом температуры стенок сопла и барокамеры, равные также комнатной, мало отличались от равновесной температуры моделей. Поэтому лучистые тепловые потоки к модели (или от нее) были при всех экспериментах очень незначительными, и ими можно было, как показали оценки, пренебречь. Перетечками тепла от королька термопары к державке, как показали оценки и специальные опыты, также можно было пренебречь.

В каждом опыте, посвященном изучению равновесной температуры, измерялись давление торможения p_0 (перед соплом), температура торможения T_0 (перед соплом), число Маха в невозмущенном (набегающем) потоке M , средняя равновесная температура модели T_e . По результатам этих измерений вычислялись r, R, K . При вычислениях принималось, что отношение изобарной и изохорной теплоемкостей воздуха $c_p/c_v = 1.4$, а μ брались из [4].



Фиг. 1

Измерение средних коэффициентов теплоотдачи α осуществлялось нестационарным методом. При проведении опыта холодная модель (имевшая температуру $T_w \approx 300^\circ \text{K}$) быстро вводилась в рабочий поток газа (при изучении теплоотдачи $T_0 \approx 490-500^\circ \text{K}$). Изменение во времени температуры модели фиксировалось осциллографом, снабженным высокочувствительными шлейфами (изменение температуры модели на 10°C вызывало отклонение светового «зайчика» на фотоленте приблизительно на $40-60 \text{ мм}$). Осциллограммы расшифровывались при помощи тарировочных графиков.



Фиг. 2

Тарировка проводилась с записью непосредственно на фотоленту осциллографа. Продолжительность эксперимента ограничивалась так, чтобы модель успевала прогреться лишь на $15-20^\circ \text{C}$. Тем самым исключались заметные лучистые утечки тепла от модели, так как температура охлаждаемых стенок барокамеры и сопла (контролировалась) приблизительно равнялась начальной температуре модели. По оценкам лучистые потоки тепла составляли величину менее одного процента от конвективных потоков. Температурный фактор t_w в процессе опыта изменялся незначительно (на $3-6\%$). В условиях опытов температурное поле модели можно было считать однородным ($\alpha D / \lambda (\text{Cu}) < 10^{-5}$).

Если лучистые потоки тепла пренебрежимо малы и температурное поле тела модели является однородным, то можно написать следующее выражение, позволяющее вычислить α по результатам опытного определения функции $T_w(\tau)^{[2]}$

$$\alpha = - \frac{cG}{F} \frac{d}{d\tau} [\ln(T_e - T_w)] \quad (1)$$

Здесь c — удельная теплоемкость меди, G — вес шара, T_w — температура шара, F — площадь поверхности шара, τ — время. Значение производной в (1) определялось графически по результатам осциллографирования. При этом для определения T_e использовались измерявшиеся в каждом опыте p_0 , T_0 , M и установленная в наших опытах по изучению равновесной температуры зависимость r от \sqrt{R}/M (фиг. 2). Вес модели G определялся взвешиванием.

Оценки показали, что ошибки опытного определения r , α , N_e могли составить соответственно $1-3\%$, $10-15\%$, $15-25\%$.

Описываемые опыты, посвященные исследованию равновесной температуры, можно разделить по числу Маха на три группы. Первая группа опытов проведена при числах $M = 2.25-2.6$ (в диапазоне чисел $R = 850-6160$, чисел $K = 0.0006-0.005$), вторая группа проведена при числах $M = 5.5-6.25$ (в диапазоне чисел $R = 88-565$, чисел $K = 0.01-0.1$) и третья — при $M = 7.5-8$ (в диапазоне чисел $R = 135-1010$, чисел $K = 0.01-0.09$). Результаты всех измерений представлены на фиг. 2 в виде зависимости коэффициента восстановления r от числа \sqrt{R}/M (точка 3 — $M = 2.25-2.6$,

4 — $M = 5.5-6.25$, 5 — $M = 7.5-8$). На этой же фигуре приведены экспериментальные данные Дрейка и Беккера [5] (точка 1 — $M = 2.24-2.75$, 2 — $M = 2.78-3.56$), Эберли (взяты из [6], фиг. 14, точка 6 — $M = 4-6$), Тауэна и Дрейка [7] (нанесены в виде заштрихованной области, $M = 4-5$), а также значения r при свободно-молекулярном режиме обтекания [8] (штрих-пунктирные линии). Наблюдается некоторая тенденция к расхождению опытных данных в зависимости от числа Маха M .

Исследования теплоотдачи проведены в диапазоне чисел $M = 6.2-6.35$, $R = 40-282$, $K = 0.033-0.24$, $t_w = 0.62-0.64$. Результаты исследований теплоотдачи представлены на фиг. 2 в виде зависимости числа Нуссельта $N_e = \alpha D/\lambda_e$ от числа Рейнольдса $R_s = u_{sp} \rho_s D_s/\mu_s$, подсчитанного по диаметру шара и параметрам потока за нормальным скачком уплотнения (u_s, ρ_s, μ_s — скорость, плотность, коэффициент вязкости газа за скачком). На этой же фигуре приведены опытные данные Эберли (точка 2 — $M = 4-6$), Дрейка и Беккера [5, 6] (точка 3 — $M = 2.78-3.56$, точка 4 — $M = 2.24-2.75$). Следует отметить, что приведенные на фиг. 2б опытные данные практически не расходятся в зависимости от числа Маха. На фиг. 2б нанесена для сравнения зависимость N от R , полученная при континуальном режиме обтекания, когда $M \rightarrow 0$ [9] (сплошная линия), а также зависимость $N_e = f(R_s)$ для режима свободно молекулярного обтекания (штрих-пунктирная линия) при условиях: $M \gg 1$, коэффициент аккомодации $\sigma = 1$, $(\mu_s \lambda/\mu \lambda_e) = 0.85$

Поступило 18 VII 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Костерин С. И., Кошмаров Ю. А., Осипов Ю. В. Исследование течения и теплообмена разреженного газа в плоском сверхзвуковом сопле. Инж.-физ. ж., 1962, т. V, № 4.
2. Костерин С. И., Кошмаров Ю. А., Горская Н. М. Экспериментальное исследование теплообмена плоской пластины в сверхзвуковом потоке разреженного газа. Инж. ж., 1962, т. 2, № 2.
3. Кошмаров Ю. А., Горская Н. М. Теплообмен пластины в сверхзвуковом потоке разреженного газа. Инж. ж., 1965, т. 5, № 2.
4. Малков М. П., Павлов К. Ф. Справочник по глубокому охлаждению. Гостехиздат, 1950.
5. Дрейк Р., Беккер Д. Теплоотдача от шара к разреженному газу в сверхзвуковом потоке. Сб. «Вопросы ракетной техники», Изд. иностр. литер., 1953, № 2 (14).
6. Шаф С. А., Шамбре П. А. Течение разреженных газов. Сб. «Основы газовой динамики» (под ред. Эммонса). Изд. иностр. литер., 1963.
7. Тоуган К. J., Драке Р. М., Jr. Flow investigation in devalal supersonic nozzles at very low pressures. Rarefied Gas Dynamics, edit. by J. A. Laurmann, v. 2, p. 402-434, New York — London, 1963.
8. Опенгейм А. К общей теории конвективного теплообмена в свободномолекулярном потоке. Сб. Механика. Изд. иностр. литер., 1953, № 5 (21).
9. Качинельсон Б. Д., Тимофеева-Агафонова Ф. А. Исследование коэффициента теплоотдачи частиц в потоке в нестационарных условиях. Изд. Котлотурбостроение, 1948, № 5.

ОБ УСТАНОВЛЕНИИ СТАЦИОНАРНОГО СМЕШЕНИЯ В СТРУЯХ

В. Т. КИРЕЕВ

(Москва)

На основе анализа автомодельных движений в нестационарном ламинарном пограничном слое [1] и при нестационарной свободной турбулентности [2] приводятся автомодельные режимы для плоской и осесимметричной струи (при ламинарном и турбулентном течениях). Приближенно определяется время установления стационарного смешения в различных поперечных сечениях этих струй.

Пусть из узкой щели или маленького круглого отверстия, начиная с момента времени $t = 0$, бьет струя жидкости в пространство, заполненное той же жидкостью, и импульс струи в сечении $x = 0$ остается постоянным

$$I_i = 2 \int_0^{\infty} (\pi y)^i \rho u^2 dy \quad (1)$$