

При больших α , когда вихри выходят из этих областей, скорость обращается в нуль при $\eta = 0$, т. е. в середине крыла. Так как на круг отображается любой контур поперечного сечения, то сказанное распространяется на пластину, полуконус и на крыло с полуконусом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Whitehead A. H. Jr. Effect of vortices on delta wing lee-side heating at Mach 6 // AIAA J.— 1970.— V. 8, N 3. Уайтхед мл. Влияние вихрей на теплообмен вдоль подветренной поверхности стреловидного крыла при $M_\infty = 6$ // Рус. пер. РТК.— 1970.— Т. 8, № 3.
2. Rao D. M., Whitehead A. H. Jr. Lee-side vortices on delta wings at hypersonic speeds // AIAA J.— 1972.— V. 10, N 11. Рао, Уайтхед мл. Вихри на теневой стороне треугольного крыла, движущегося с гиперзвуковой скоростью // Рус. пер. РТК.— 1972.— Т. 10, № 11.
3. Давыдова Н. А., Зайцев Ю. П., Юшин А. Я. Экспериментальное исследование аэродинамического нагрева верхней поверхности плоских треугольных крыльев при сверхзвуковых скоростях // Учен. зап. ЦАГИ.— 1974.— Т. 6, № 5.
4. Майкапар Г. И. Аэродинамическое нагревание подветренной стороны тела при сверхзвуковых скоростях // Учен. зап. ЦАГИ.— 1972.— Т. 3, № 6.
5. Боровой В. Я. Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем.— М.: Машиностроение, 1983.
6. Narayan K. Y. Lee-side flowfield and heat transfer of delta wing at Mach 10 // AIAA J.— 1978.— V. 16, N 2. Нараян К. И. Исследование поля течения и теплообмена на подветренной стороне треугольного крыла при $M_\infty = 10$ // РТК.— 1978.— Т. 16, № 2.
7. Келдыш В. В., Лапина Н. Г. Экспериментальное исследование течения в окрестности треугольных крыльев с острой и закругленной передней кромкой при сверхзвуковых скоростях // Тр. ЦАГИ.— 1980.— Вып. 2074.
8. Майкапар Г. И. Отрывные течения у подветренной стороны треугольного крыла и тела вращения в сверхзвуковом потоке // Учен. зап. ЦАГИ.— 1982.— Т. 13, № 4.
9. Rizzetta D. P., Shang J. S. Numerical simulation of leading-edge vortex flows // AIAA J.— 1968.— V. 24, N 2. Ризетта Д. П., Шенг Дж. С. Численный расчет вихревой структуры, образующейся при срывном обтекании передней кромки крыла // Аэрокосм. техника.— 1986.— № 7.
10. Ардашева М. М., Ильина С. А. и др. Применение плавящихся термоиндикаторов для измерения тепловых потоков к моделям в аэродинамических трубах // Учен. зап. ЦАГИ.— 1972.— Т. 3, № 1.
11. Боровой В. Я., Иванов Б. А. и др. Визуализация пространственного обтекания моделей с помощью «лазерного ножа» // Учен. зап. ЦАГИ.— 1973.— Т. 4, № 5.
12. Бражко В. И. Способ визуализации линий тока на поверхности моделей в аэродинамических трубах // Тр. ЦАГИ.— 1976.— Вып. 1749.
13. Башкин В. А. Расчет коэффициентов сопротивления трения и теплопередачи пластины, конуса и тупоносого тела в окрестности критической точки при ламинарном течении в пограничном слое без учета диссоциации // Тр. ЦАГИ.— 1964.— Вып. 937.
14. Гарбузов В. М., Колина Н. П., Пятнова А. И. Расчет коэффициентов сопротивления трения и теплопередачи пластины и острого конуса, обтекаемого сверхзвуковым потоком, при турбулентном течении в пограничном слое // Тр. ЦАГИ.— 1977.— Вып. 1881.

г. Москва

Поступила 23/II 1988 г.

УДК 536.24

Б. И. Заславский, Б. В. Юрьев

О КОНВЕКТИВНОМ ТЕПЛОТВОДЕ ОТ ВНЕЗАПНО ВОЗНИКШЕГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПЯТНА

В работе приводятся результаты экспериментального исследования нестационарных процессов передачи тепла в атмосфере от внезапно нагретой тонкой пластины, лежащей на горизонтальном нетеплопроводном основании, дополняющие результаты [1]. Проблемы нестационарных процессов, связанных с конвективным охлаждением внезапно нагретых объектов, обсуждались в [2—5].

Согласно [1], рассмотрим задачу в следующей постановке. Пусть в момент времени $t = 0$ в поле силы тяжести g на горизонтальной нетеплопроводной поверхности S внезапно (за время, много меньшее характерного времени формирования движения) образуется круглое тепловое

пятно с осесимметричным распределением температуры по поверхности $T_{\text{пл}}(r) = T_0 + T_{\text{п}}(r)$ (T_0 — температура внешней среды, а r — расстояние от центра пятна (в дальнейшем будем пользоваться цилиндрической системой координат (r, z)). Предположим, что нагретый слой на нетеплопроводной поверхности бесконечно тонок, но имеет конечную поверхностную теплоемкость $C_{\text{п}}$.

Полупространство над плоскостью S заполнено средой, характеризующейся плотностью ρ , давлением p и объемной теплоемкостью C_p . Все эти величины — функции состояния среды и, следовательно, в процессе движения могут меняться как от времени, так и от точки к точке. В начальный момент времени в области пространства, не возмущенного влиянием теплового пятна, $\rho = \rho_0$, $p = p_0$, $T = T_0$.

В [1] показано, что распределение температуры над поверхностью теплового пятна при $t > 0$ может быть представлено в виде

$$(1) \quad T^0 = T/T_{\text{п0}} = T^0(r^0, z^0, t^0), \quad z^0 = z/\Lambda_0, \quad r^0 = r/\Lambda_0, \quad t^0 = t/\lambda_0$$

($T_{\text{п0}}$ — характерное (или максимальное) значение перепада температуры на поверхности S при $t = 0$). Параметры Λ_0 и λ_0 , имеющие размерности соответственно длины и времени, можно рассматривать как характерный размер возмущенной области и время ее формирования. В [1] методами теории размерностей с точностью до множителя Λ определены параметры Λ_0 и λ_0 :

$$(2) \quad \Lambda_0 = \Lambda \sqrt{Qg/(C_p T_{\text{п0}}^2 \rho_0)}, \quad \lambda_0 = \sqrt{\Lambda_0 T_{\text{п0}}/(T_{\text{п0}} g)}.$$

Здесь и ниже H_0 — характерный размер теплового пятна; Q — количество энергии, переданной атмосфере тепловым пятном.

В [1] предполагалось, что Λ и $C_{\text{п}}$ — постоянные, и было показано, что в некотором диапазоне определяющих движение параметров предположение о постоянстве Λ (при $C_{\text{п}} = \text{const}$) хорошо подтверждается наблюдениями и что существуют пределы, за которыми имеет место отклонение экспериментальных данных, обработанных в соответствии с (1) от единичных кривых, построенных в координатах (1) при $\Lambda = \text{const}$ и $C_{\text{п}} = \text{const}$.

Если не принимать предположение о постоянстве Λ и $C_{\text{п}}$, то, исходя из указанного в [1] ряда определяющих параметров F , i_0 , $T_{\text{п0}}$, $gT_{\text{п0}}/T_0$, $C_{\text{п}}$ ($F = gQ/(C_p T_0)$ — дефицит веса, i_0 — удельная энтальпия среды), получаем единственную безразмерную комбинацию $\eta = \sqrt{F i_0/(C_{\text{п}} T_{\text{п0}})}$. Отсюда следует, что в общем случае $\Lambda = \Lambda(\eta)$. Поскольку $Q \sim C_{\text{п}} T_{\text{п0}} H_0^2$ (см. [1]), из найденных соотношений вытекает

$$(3) \quad \eta = H_0 \sqrt{\rho_0 g/(C_{\text{п}} T_{\text{п0}})}.$$

При $\eta \ll 1$ можно разложить $\Lambda(\eta)$ в ряд по η : $\Lambda(\eta) = \Lambda(0) + \eta \Lambda'(0) + \dots$ При достаточно малых значениях параметра η $\Lambda = \Lambda(0) = \text{const}$. Этот случай при $C_{\text{п}} = \text{const}$ фактически и рассмотрен в [1]. При этом, используя (1) и (2), координаты, время и перепад температур, например, для начального распределения температуры на поверхности теплового пятна

$$(4) \quad T_{\text{п}}(r) = T_{\text{п0}} (1 + r^2/H_0^2)^{-3/2}$$

можно привести к безразмерному виду

$$(5) \quad \Lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{\mu_{\text{в}} T_{\text{п0}} \rho_{\text{в}} T_{\text{ов}} H_0^2 C_{\text{п}}^0}{T_{\text{ов}}^2 \rho_0 C^2}}, \quad \lambda_0 = \sqrt[4]{\frac{\mu_{\text{в}} C_{\text{п}}^0 T_{\text{ов}}^2 \rho_{\text{в}} H_0^2}{T_{\text{п0}} \rho_0 g^2 C^2 T_{\text{ов}}}},$$

$$z^0 = \frac{zC}{H_0} \sqrt{\frac{T_{\text{ов}}^2 \rho_0}{T_{\text{п0}} T_{\text{ов}} \rho_{\text{в}} C_{\text{п}}^0}}, \quad r^0 = \frac{rC}{H_0} \sqrt{\frac{T_{\text{ов}}^2 \rho_0}{T_{\text{п0}} T_{\text{ов}} \rho_{\text{в}} C_{\text{п}}^0}}, \quad t^0 = t \sqrt[4]{\frac{T_{\text{п0}} T_{\text{ов}}^2 \rho_{\text{в}}^2 g^2 C^2}{T_{\text{ов}}^2 \rho_{\text{в}} H_0^2 C_{\text{п}}^0}},$$

$$T^0 = \frac{T}{T_{\text{п0}}}, \quad \mu_{\text{в}} = \frac{2\pi \Lambda^2 C_{\text{п0}} g}{C_{\text{пв}}^2 T_{\text{ов}} \rho_{\text{в}}}, \quad C = \frac{C_p}{C_{\text{пв}}}, \quad C_{\text{п}}^0 = \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{п0}}},$$

где $C_{\text{рв}}$, $\rho_{\text{в}}$ — теплоемкость и плотность воздуха при давлении 10^5 Па и температуре $T_{0\text{в}} = 290$ К, $C_{\text{п0}} = 800$ Дж/(м²·К).

Для начального распределения температуры на поверхности теплового пятна

$$T_{\text{п}}(r) = T_{\text{п0}} \text{ при } r \leq r_0, \quad T_{\text{п}}(r) = 0 \text{ при } r > r_0$$

формулы (5) имеют тот же вид, однако параметр H_0 заменяется на r_0 . Формулы (5) отличаются от соответствующих соотношений, полученных в [1], тем, что в них входит $C_{\text{п}}$ в явном виде (в [1] этот параметр был включен в выражение для $\mu_{\text{в}}$).

Преобразования (5) выражают общие законы развития рассматриваемых движений. Для того чтобы получить формулы для определения таких величин, как характерное время развития движения, размеры области атмосферы, возмущенной влиянием теплового пятна, а также вычислить коэффициент теплоотдачи k , рассмотрим задачу об охлаждении пятна. Динамика охлаждения может быть установлена на основании закона Ньютона [6]. При этом, как известно, теплоотдача в атмосферу единицы площади S пропорциональна $T_{\text{п}}$ — температуре теплового пятна:

$$(6) \quad dQ_S/dt = C_{\text{п}}dT_{\text{п}}/dt = -kT_{\text{п}}.$$

Из (6) вытекает

$$(7) \quad T_{\text{п}} = T_{\text{п0}}e^{-kt/C_{\text{п}}}.$$

Значение $C_{\text{п}}$ в процессе опытов неизменно. Коэффициент k зависит от характера процесса теплоотдачи, от плотности и температуры внешней среды. Из (5) и (7) следует

$$k = k(\eta) = -(C_{\text{п}}/t) \ln (T_{\text{п}}/T_{\text{п0}})$$

или

$$(8) \quad k^0(\eta) = \frac{C_{\text{п}}^0}{t^0} \ln T_{\text{п}}^0,$$

где $k^0 = k\lambda_0/C_{\text{п0}}$. При этом

$$k = k^0 C_{\text{п0}} \sqrt[4]{\frac{T_{\text{п0}}^0 \rho_0 g^2 C^2 T_{0\text{в}}}{T_0^2 \rho_{\text{в}} H_0^2 C_{\text{п}}^0}}.$$

Заметим, что безразмерный коэффициент теплопередачи является функцией параметра η :

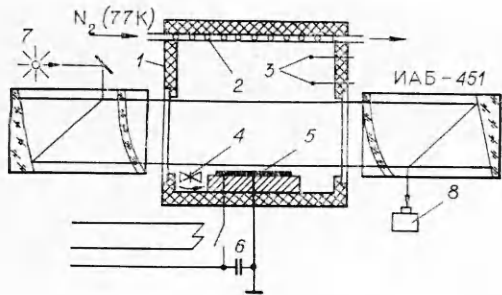
$$(9) \quad k^0 = k^0(\eta).$$

При $\eta \ll 1$ его можно представить в виде

$$(10) \quad k^0(\eta) = k^0(0) + \eta(k^0)'(0) + \dots$$

В случае достаточно малых η получаем $k^0 \simeq k^0(0)$. Равенства (7) и (8) показывают, что коэффициент k может быть найден с помощью кривой охлаждения теплового пятна. Соотношение (10) позволяет приближенно получить погрешность, допускаемую при замене k^0 на $k^0(0)$, т. е. определить $k^0 - k^0(0) = \delta(\eta)$.

Для проверки изложенной выше теории, а также для нахождения k были проведены эксперименты на двух установках. Конструкция первой и методика работы на ней подробно обсуждались в [1]. Опыты проводились в барокамере, обеспечивающей возможность варьирования начальной плотности и давления среды. В барокамеру помещено устройство для создания теплового пятна. Визуализация конвективного потока осуществлялась прибором Теплера ИАБ-451. Движение фиксировалось кинокамерой КОНВАС-автомат. Температура нагретого газа измерялась термоанемометрами фирмы DISA, а изменение температуры теплового пятна — термопарами.



Р и с. 1

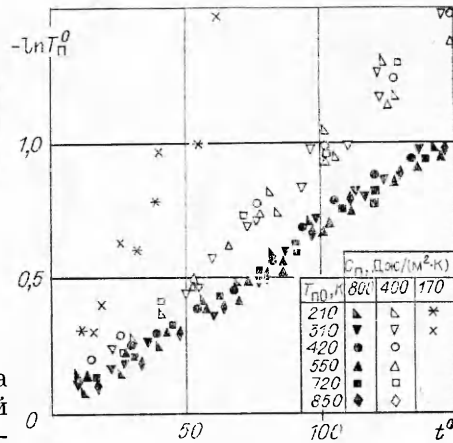
Вторая установка предназначена для исследования влияния начальной температуры атмосферы на закономерности формирования и подъема конвективного потока. Схема установки представлена на рис. 1. Опыты проводились в камере 1 размерами $0,4 \times 0,4 \times 0,4$ м с теплоизолированными стенками. Для охлаждения газа в камере в верхней ее части находится радиатор 2, через который прокачивался жидкий азот. При этом воздух внутри камеры охлаждался до заданной температуры, определяемой скоростью прокачки азота. Температура газа в камере контролировалась термопарами 3, расположенными на нескольких уровнях. Для устранения стратификации в камере имеется вентилятор 4, перемешивающий газ и увеличивающий таким образом теплообмен от радиатора. Непосредственно перед созданием теплового пятна вентилятор выключается. Для получения в камере воздуха, нагретого выше комнатной температуры, над вентилятором расположен нагреватель.

Тепловое пятно создавалось (как и на первой установке) на поверхности нетеплопроводной пластины при помощи укрепленного на ней нагревателя 5 из фольги со спиралевидным вырезом, через которую в начальный момент времени разряжалась батарея высоковольтных конденсаторов 6. Начальное распределение температуры на поверхности теплового пятна соответствовало зависимости (4). В опытах использовалась батарея конденсаторов общей емкостью 2400 мкФ, которая заряжалась до 0,5—1,5 кВ, что обеспечивало варьирование температуры в центре теплового пятна в диапазоне 100—800 К. Параметр C_{II} варьировался при замене нагревателя на аналогичный, но выполненный из фольги другой толщины. На рис. 1 7 — источник света, 8 — кинокамера.

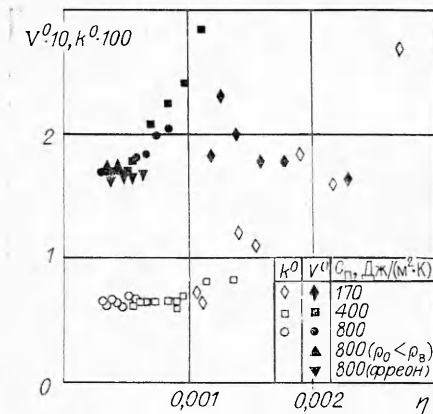
Данные по изменению температуры теплового пятна в зависимости от времени при различных значениях начальной температуры теплового пятна, поверхностной теплоемкости и начальной температуры среды представлены на рис. 2 в безразмерных координатах (5). Видно, что кроме начального участка, на котором играет роль инерционность термопар, экспериментальные точки группируются вдоль единых кривых. На рис. 3 показана зависимость $k^0 = k^0(\eta)$.

На рис. 4 приведены в безразмерных координатах (5) графики движения $z^0 = z^0(t^0)$ вершины температурной волны при различных значениях $T_{п0}$ и T_0 . Сплошная линия взята из [1] и соответствует усредненному графику движения температурной волны, полученному при различных значениях $T_{п0}$, H_0 и C_p . Данные настоящей работы при варьировании начальной температуры среды с малым разбросом группируются вдоль этой линии.

На рис. 4 показано, что в точке с координатами $z^0 = 1$, $t^0 = 9$ кривые $z^0 = z^0(t^0)$ для $T_{п0} < T_R$ ($T_R = T_R(C_{II})$) отклоняются от основной кривой (экспериментальные точки располагаются вдоль прямых, наклон которых зависит от $T_{п0}$). За меру отклонения примем скорость подъема верхней точки тепловой волны $V^0 = dz^0/dt^0$. Графики зависимости $V^0 = V^0(\eta)$



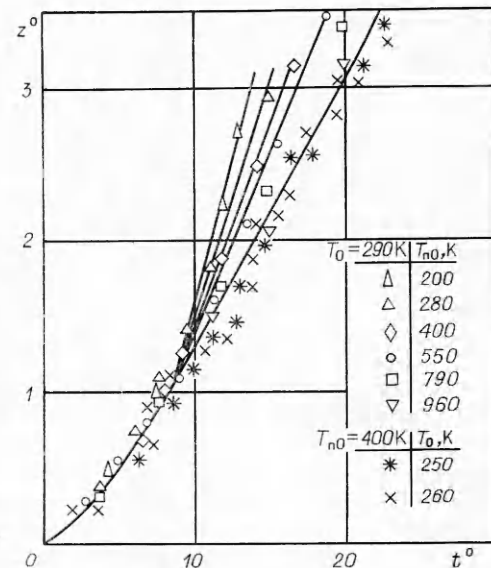
Р и с. 2



Р и с. 3

приведены также на рис. 3, откуда видно, что соотношения $\Lambda \approx \Lambda(0)$ и $k^0 \approx k^0(0)$ приближенно верны при $\eta < 10^{-3}$. При больших значениях η как Λ , так и k^0 существенно зависят от η . Заметим, что полученные данные позволяют определить $k^0(0) = 6 \cdot 10^{-3}$. Коэффициент теплопередачи можно вычислить по формуле (8).

Таким образом, при $\eta < 10^{-3}$ выполняется показанное в [1] подобие движений атмосферы, возмущенной внезапно возникшим высокотемпературным тепловым пятном (при подобии в начальном распределении температуры). В случае, когда $\eta > 10^{-3}$, для сохранения подобия необходимо выполнение условия $\eta = \text{idem}$.



Р и с. 4

ЛИТЕРАТУРА

1. Заславский Б. И., Юрьев Б. В. Экспериментальное исследование конвективного потока от внезапно возникшего плоского горизонтального источника тепла // ПМТФ.— 1985.— № 5.
2. Shlien D. J. Some laminar thermal and plume experiments // Phys. Fluids.— 1976.— V. 19, N 8.
3. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкости.— М.: Мир, 1977.
4. Джагурия Й. Естественная конвекция.— М.: Мир, 1983.
5. Заславский Б. И., Юрьев Б. В. О моделировании нестационарных процессов теплообмена на поверхности океана // Измерения в гидроаэродинамике и геофизической акустике.— М.: ВНИИФТРИ, 1984.
6. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи.— М.: Энергия, 1973.

г. Москва

Поступила 4/III 1988 г.

УДК 534.13:533.601.15

В. И. Запругаев, С. Г. Миронов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ В ПЕРЕДНЕЙ ОТРЫВНОЙ ЗОНЕ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА

Необходимость исследования пульсационных явлений для конфигураций с передними отрывными зонами обусловлена возможностью уменьшения сопротивления тела при выборе соответствующей геометрии зоны отрыва. Данные об осредненных и пульсационных характеристиках для тел с выступающей вперед иглой приведены в [1—15]. Флуктуации в отрывной зоне [6, 8] разделяются на пульсации с существенным изменением зоны отрыва, которые называют нестационарным режимом второго рода [6], пульсациями [8], пульсациями E-типа [4] или катастрофическими пульсациями [5]. К этому же типу флуктуаций отнесены массорасходные пульсации [13—15]. Флуктуации без заметного изменения зоны отрыва называют нестационарным