ЛИТЕРАТУРА

1. **Ентов В. М., Полищук А. М.** О роли сорбционных процессов при движении полимерных растворов в пористой среде.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 3.
2. **Ентов В. М., Хавкин А. Я., Чен-Син Э.** Расчеты процессов вытеснения нефти раствором активной примеси.— В сб.: Численное решение задач фильтрации многофазной несжимаемой жидкости. Новосибирск, 1977.
3. **Брагинская Г. С., Ентов В. М.** О неизотермическом вытеснении нефти раствором активной примеси. Препринт № 112. М.: изд. Ин-та проблем механики АН СССР, 1978
4. **Ентов В. М.** Физико-химическая гидродинамика процессов в пористых средах (математические модели методов повышения нефтеотдачи пластов). Препринт № 161. М.: изд. Ин-та проблем механики АН СССР, 1980.
5. **Зискин Е. А., Рыжик В. М.** Автомодельные решения задач двухфазного вытеснения нефти раствором активной примеси с учетом массообмена между фазами.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 4.
6. **Бан А. и др.** Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. М.: Гостоптехиздат, 1963.
7. **Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М.** Теория нестационарной фильтрации жидкости и газа. М.: Недра, 1972.
8. **Олейник О. А.** О единственности и устойчивости обобщенного решения задачи Коши для квазилинейного уравнения.— УМН, 1959, т. XIV, вып. 2(86).
9. **Рождественский Б. Л., Яненко Н. Н.** Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. М.: Наука, 1978.
10. **Тихонов А. Н., Жуховицкий А. А., Забежинский Я. Л.** Поглощение газа из тока воздуха слоем зернистого материала.— ЖФХ, 1946, т. 20, вып. 10.

УДК 533.6.071.8 + 533.6.011.6

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОРМОЖЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПОТОКОВ ГАЗА С ПОМОЩЬЮ РАДИАЦИОННО-КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

А. И. Данилевич

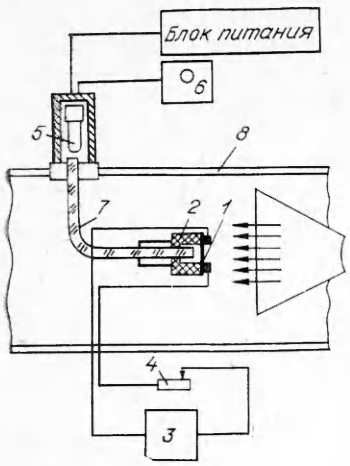
(*Москва*)

Температура торможения является одним из определяющих параметров газового потока при моделировании реальных условий обтекания моделей в аэродинамических трубах и установках. На ряде установок кратковременного действия значение температуры торможения определяется лишь расчетным путем по косвенным измерениям (например, расходным методом) либо по измерениям в ресивере или форкамере, что приводит к значительным погрешностям. Известные методы и устройства для измерения температуры газовых потоков [1—4] в большинстве своем обладают большой тепловой инерцией.

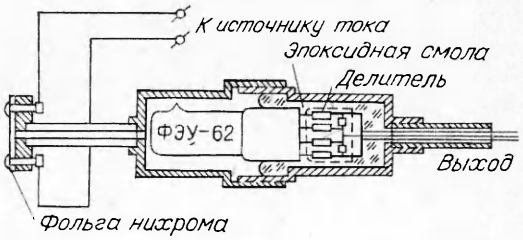
В данной работе описываются измерения температуры торможения горячего газа с помощью радиационно-калориметрического датчика, разработанного ранее для измерения величины теплового потока [5]. Используется способ прямого сравнения температуры заторможенного газового потока с температурой нагретого чувствительного элемента датчика.

Описание метода измерения температуры. В соответствии со вторым началом термодинамики тело, помещенное в зоне торможения потока газа, охлаждается, если температура тела больше температуры торможения газа, и нагревается, если температура тела ниже температуры торможения газа. В случае, если теплообмен отсутствует, можно сделать заключение, что температура торможения газа T_0 и температура тела в зоне торможения равны.

Обычно в измерительной технике методом последовательных приближений подбирают такую величину энергии, подводимую к нагревателю термоприемника, при которой показания датчика не изменяются с введением его в поток газа. Такой способ продолжителен по времени и не позволяет достигнуть высокой точности, так как связан с чисто эмпирическим подбором режима подогревателя термоприемника и необходимостью строгого постоянства параметров измеряемого потока. Применение динамического способа определения температуры по темпу ее изменения [6] позволяет уменьшить число сравнений до двух.



Фиг. 1



Фиг. 2

Измерительная система, применяемая в данной работе, показана на фиг. 1. В качестве чувствительного элемента используется нихромовая фольга *1*, ориентированная перпендикулярно потоку газа и укрепленная на изолирующей вставке *2*. Для теплостойкости вставка изготовлена из асбоцемента. Фольга нагревается путем пропускания постоянного электрического тока от источника тока *3* (батарея щелочных аккумуляторов). Ток накала регулируется с помощью малоомного реостата *4*. Температура фольги контролируется на ее подветренной стороне путем регистрации радиационного инфракрасного излучения с помощью фотоэлектронного умножителя *5* и осциллографа *6*. Излучение от фольги с помощью гибкого волоконного световода *7* выводится за пределы рабочей камеры аэродинамической трубы *8*.

В экспериментах применялась также и более компактная конструкция, в которой фольга, световод и ФЭУ скомпонованы в один узел, помещаемый в рабочей камере трубы (фиг. 2). При этом производится тщательная заливка пластифицированным эпоксидным компаундом цепей высокого напряжения ФЭУ, чтобы исключить возможность электрических микропробоев газа в разреженной среде камеры.

Для определения температуры торможения газового потока на каждом режиме работы трубы использовались два пуска. В каждом пуске предварительно устанавливалась и фиксировалась температура нагрева фольги без потока и затем регистрировалось изменение радиационного излучения фольги в потоке. Температуры предварительного канала фольги T_1 и T_2 выбирались вблизи от предполагаемого значения температуры торможения газа T_0, причем $T_1 \neq T_2$.

Применяемый для обработки полученных осциллограмм динамический способ определения температуры основан на использовании уравнения теплового баланса и эмпирической зависимости сигнала рассматриваемого датчика от радиационной температуры чувствительного элемента. Уравнение теплового баланса для системы фольга — газ в соответствии с гипотезой Ньютона можно записать в виде простого дифференциального уравнения

$$cm(dT/dt) = -\gamma(T - T_0),$$

где c — теплоемкость; m — масса фольги; γ — коэффициент теплопередачи; T — температура фольги. Из этого уравнения следует, что изменение температуры фольги во времени носит экспоненциальный характер

$$T - T_0 = (T_ф - T_0)e^{-\beta t}, \tag{1}$$

где $T_ф$ — первоначальная температура нагрева фольги; $\beta = \gamma/mc$. Экспоненциальный характер приведенной зависимости подтверждается фактическим видом экспериментальных осциллограмм регистрируемого сигнала.

Для регистрации радиационного излучения фольги использовался фотоумножитель ФЭУ-62 с кислородно-серебряным фотокатодом, чувствительным к длинам волн излучения в диапазоне 0,4—1,2 мм.

По характеристике спектральной чувствительности, аппроксимированной соответствующей функцией, теоретически рассчитана (аналогично расчету [5]) зависимость сигнала датчика V (тока фотоумножителя) от температуры фольги T. В рассматриваемом диапазоне температур 600—1000 К эта зависимость может быть выражена степенной функцией $V = \text{const}\, T^{\alpha}$ с показателем $\alpha \simeq 19{,}4$. Теоретическая зависимость удовлетворительно согласуется с тарировочной кривой, приведенной в двойном логарифмическом масштабе на фиг. 4.

Для степенной зависимости при небольших изменениях температуры фольги относительное изменение сигнала датчика в α раз больше относительного изменения температуры

$$dV/V = \alpha dT/T, \tag{2}$$

что при большом показателе α обеспечивает высокую чувствительность датчика.

Пусть T_1 — температура фольги датчика в первом пуске, T_2 — во втором. Тогда в соответствии с (1) их производные по времени имеют вид

$$dT_1/dt = \beta(T_0 - T_1),\ dT_2/dt = \beta(T_0 - T_2). \tag{3}$$

Производные температуры выражаются через производные сигнала датчика в соответствии с (2):

$$dT_1/dt = (T_1/\alpha V_1)dV_1/dt,\ dT_2/dt = (T_2/\alpha V_2)dV_2/dt. \tag{4}$$

Решая совместно систему уравнений (3), (4), находим формулу для определения температуры торможения

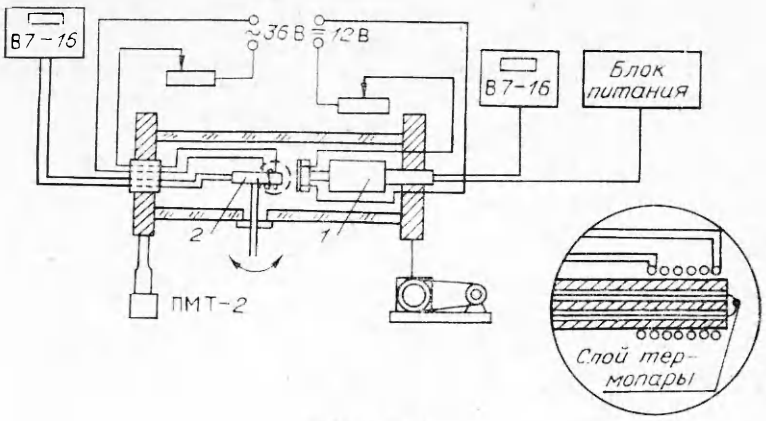
$$T_0 = \frac{T_1 T_2 (k_2/k_1 - 1)}{\frac{k_2}{k_1} T_2 - T_1}, \tag{5}$$

где $k_1 = \frac{dV_1}{dt}\Big/V_1,\quad k_2 = \frac{dV_2}{dt}\Big/V_2.$

Величины k_1 и k_2 представляют собой относительные или логарифмические производные сигнала датчика. Их можно измерить непосредственно по осциллограммам сигнала датчика. Из формулы (5) видно, что большей точности можно достичь, если производные k_1 и k_2 имеют противоположные знаки. Это имеет место, когда температура предварительного нагрева фольги в одном пуске превышает температуру T_0 газа, а в другом меньше, например, если $T_1 < T_0 < T_2$.

Градуировка датчика. Градуировка описанного датчика производилась в целью установления экспериментальной зависимости между выходным сигналом и температурой нагрева фольги T. Проведение градуировки в данном случае связано с определенной сложностью. Поскольку фольга очень тонкая (10—20 мкм), то припаивать к ней термоэлектрический преобразователь нельзя. Контакт фольги с термопарой неизбежно приведет к изменению условий конвективного и излучательного теплообмена со средой, вызовет неравномерность теплового поля фольги в зоне контакта и связанный с этим значительный уход сигнала фотоумножителя. При температурах фольги выше 800°С в [5] для градуировки применялся оптический пирометр. При более низких температурах возможно применение инфракрасной техники измерения температуры, однако в этих случаях определяется яркостная температура поверхности тела. Для нахождения истинной температуры необходимо знание точного значения спектральной излучательной способности тела при данной температуре, которое чаще всего известно лишь приблизительно.

Наиболее надежным выглядит способ, при котором снимается кривая спектрального излучения фольги и по максимуму этой кривой λ_{max} с помощью закона смещения Вина $\lambda_{max} T = 2884$ мкм·град определяется истинная температура поверхности тела T. Для реализации этого способа необходима довольно сложная аппаратура спектрального анализа в инфракрасной области.



Фиг. 3

В данной работе применялся простой, но довольно трудоемкий способ кратковременного соприкосновения нагретого спая термоэлектрического преобразователя и фольги датчика с целью сравнения их температур. Измерительная схема градуировки приведена на фиг. 3. Датчик *1* помещался в вакуумированный объем — отрезок стеклянной трубы, откачиваемый до давления $p \simeq 5$Па для уменьшения погрешностей, связанных с конвекцией воздуха около чувствительного элемента. Для измерения температуры накала фольги применялся хромель-копелевый термоэлектрический преобразователь *2* с косвенным подогревом, конструкция которого предложена Г. Е. Первушиным. Преобразователь помещен внутри керамической трубки, его спай расплющен и находится вблизи торца трубки. На трубку намотана электрическая спираль, поднимающая температуру спая до некоторой величины. Соответствующая этой величине термо-ЭДС контролировалась цифровым вольтметром В7-16. Затем проводилось быстрое касание спаем термопары накаленной фольги датчика. Если значение термо-ЭДС уменьшалось, то делалось заключение, что фольга холоднее спая термопары и соответственно наоборот. Подбирая накал спирали, удалось с точностью $\pm 15°$ сопоставить температуру спая термоэлектрического преобразователя и температуру фольги.

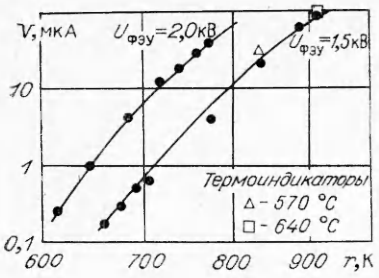
Другим способом градуировка проводилась с помощью термоиндикаторов. Температуры плавления термоиндикаторов соответственно 570 и 640°С.

Полученным таким образом значениям температуры фольги ставились в соответствие значения выходного тока фотоумножителя. Результаты градуировок представлены на фиг. 4 для двух значений напряжения фотоумножителя. Точность градуировки оценивается в $\pm 15°$.

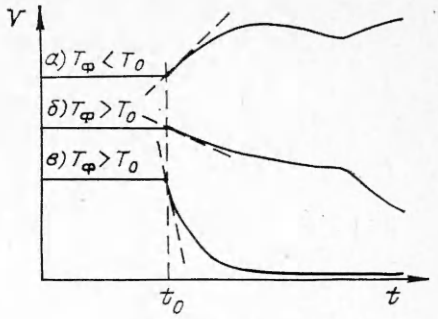
Измерение температуры торможения. Измерения с помощью описанного датчика проводились на вакуумной аэродинамической трубе кратковременного действия. Труба снабжена электрическим омическим подогревателем. Для одного измерения использовались два или более последовательных пусков с установлением одинаковых начальных условий. Расхождение по величине давления торможения составляло не более 1%.

По осциллограммам испытаний определялись отношения производной сигнала датчика в начальный момент торможения газа к величине первоначального сигнала без потока (величины K_1 и K_2). Также по уровню сигнала без потока с помощью градуировочного графика определялись температуры накала фольги T_1 и T_2. Полученные данные подставлялись в

	Азот		Аргон		CO_2	
T_0, К	890	810	780	980	840	730
T_0^p	—	850	850	950	—	—
T_0^i	870	780	760	810	810	700



Фиг. 4



Фиг. 5

формулу (5), и вычислялась температура торможения T_0. Вид типичных осциллограмм показан на фиг. 5.

В таблице представлены некоторые результаты измерений при различных условиях в сверхзвуковых потоках азота, аргона и углекислого газа. Приведено сравнение с температурой T_0^v, рассчитанной по расходному методу, и температурой T_0^i, измеренной термоэлектрическим преобразователем обычной конструкции без экрана, помещенным в форкамере трубы и дающим заведомо заниженные значения.

Следует отметить, что, кроме погрешности тарировки, возможна трудноучитываемая погрешность, связанная с недостаточно удовлетворительной повторяемостью пусков по отношению к температуре торможения. Обойти эту трудность и проводить измерения T_0 в одном пуске позволит, по-видимому, применение двух датчиков с идентичными характеристиками, но с различными температурами предварительного нагрева чувствительного элемента.

Описанная методика отличается высоким разрешением во времени. Постоянная термической инерции чувствительного элемента, выполненного из нихромовой фольги толщиной $h = 10$ мкм, составляет

$$\tau = \rho c h^2/4\varkappa \simeq 1{,}7 \text{ мкс}.$$

Динамическая погрешность измерения температуры с использованием (2) выражается в виде

$$\Delta T_{дин} = \tau dT/dt = (\tau/\alpha)(dV/dt)T/V$$

и для условий проведенного эксперимента не превышает значения 0,1К.

Радиационно-калориметрический преобразователь имеет наибольшую чувствительность по отношению к температуре в сравнении с другими известными преобразователями [1]. Например, чувствительность термоэлектрических преобразователей при измерении высоких температур не превышает 0,05 мВ/К. Чувствительность термометром сопротивления для опорного напряжения $U_0 = 1$В и температурного коэффициента сопротивления $\alpha_t \simeq 0{,}004$ 1/К составляет 4 мВ/К. Чувствительность же рассмотренного датчика при $T = 800$ К составляет $dV/dt = \alpha V/t \simeq 25$ мВ/К и может быть увеличена путем технологических улучшений.

Автор выражает глубокую признательность В. А. Горелову и А. С. Королеву за полезные обсуждения.

Поступила 9 IX 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. **Линевег Ф.** Измерение температур в технике. М.: Металлургия, 1980.
2. **Гордов А. Н.** Измерения температур газовых потоков. М.— Л.: Машгиз, 1962.
3. **Рагулин Н. Ф.** Нестационарные методы измерения температуры и теплоотдачи при высоких температурах потока.— Труды ЦАГИ, 1970, вып. 1279.
4. **Sanford J.** What's happening in temperature monitoring and control.— Instrumentation and Control Systems, 1976, vol. 49, N 5.
5. **Данилевич А. И.** О радиационно-калориметрической методике измерения теплового потока в сверхзвуковых течениях газа.— Учен. зап. ЦАГИ, 1981, т. 9, № 2.
6. **Бжозовский В., Сукевер Ш., Енджеец Г.** Динамическая термопара для измерения температур плазмы до 4000°С.— В сб.: Низкотемпературная плазма. М.: Мир, 1967.