

УДК 629.7.036:536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА В РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ИМПУЛЬСНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

Ю. В. Громыко, А. А. Маслов, П. А. Поливанов,
И. С. Цырюльников, В. В. Шумский, М. И. Ярославцев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск
E-mails: shumsky@itam.nsc.ru, yaroslav@itam.nsc.ru

Изложены результаты сравнения расчетных параметров газового потока в рабочей части высокоэнтальпийной установки кратковременного режима — импульсной аэродинамической трубы ИТ-302М — с экспериментально определенными значениями. Показано, что различие измеренных двумя способами характеристик потока в рабочей части (расхода, определенного с помощью метода наполнения баллона, и физической скорости, определенной с помощью метода PIV) и их расчетных значений не превышает нескольких процентов. В экспериментах установлено, что предположения и допущения, принятые для расчета параметров потока в рабочей части, достаточно точно описывают процессы, происходящие в газодинамическом тракте импульсной трубы. Обнаружено, что наиболее существенное различие расчетных и экспериментальных значений обусловлено двумя факторами: неучетом потерь тепла от рабочего тела (газового потока) к стенкам первой форкамеры и неопределенностью в восстановлении величины давления в первой форкамере в момент $t = 0$.

Ключевые слова: высокоэнтальпийная установка кратковременного режима, форкамера, электрический разряд, пробоотборник, метод наполнения баллона, метод PIV определения физической скорости потока.

Одной из особенностей испытания газодинамических моделей в высокоэнтальпийных установках кратковременного режима типа импульсных труб является то, что для определения параметров рабочего тела (РТ), обтекающего модель, размещаемую в рабочей части установки, имеется ограниченное количество измеряемых величин. Например, в импульсной трубе ИТ-302М Института теоретической и прикладной механики СО РАН, схема которой приведена на рис. 1, измеряются температура $T_{\Phi 1}^H \approx 293$ К и давление $p_{\Phi 1}^H$ накачки в первую форкамеру (ФК) исходного состава, необходимого для образования РТ установки. В течение рабочего режима измеряются давления $p_{\Phi 1}(t)$, $p_{\Phi 2}(t)$ РТ в ФК и с помощью трубки Пито давление $p'_0(t)$ на срезе сопла за прямым скачком уплотнения. Этот ограниченный набор измеряемых величин не позволяет экспериментальным путем определить требуемый набор параметров набегающего потока, таких как скорость, статические

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 10-08-00138-а).

© Громыко Ю. В., Маслов А. А., Поливанов П. А., Цырюльников И. С.,
Шумский В. В., Ярославцев М. И., 2012

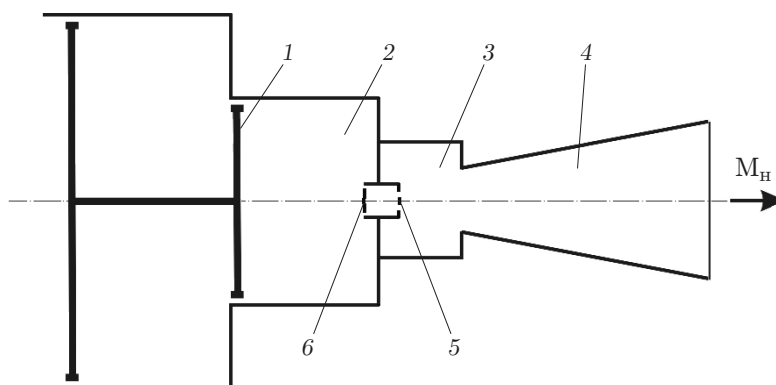


Рис. 1. Схема установки:

1 — мультипликатор; 2 — первая ФК; 3 — вторая ФК; 4 — сопло; 5 — дросселирующая решетка; 6 — диафрагма

давление и температура и т. д. Необходимо использовать ряд допущений. В данной работе верхний индекс n соответствует параметрам накачки сред в первую ФК, нижние индексы $\phi 1$, $\phi 2$, n — параметрам в первой, второй ФК и параметрам набегающего на модель потока (параметрам в рабочей части установки).

1. Методика определения параметров РТ в рабочей части установки. Для определения параметров РТ на срезе сопла (в рабочей части установки) используется последовательность состояний РТ в тракте установки [1–3]. С помощью двух известных параметров $p_{\phi 1}^n$ и $T_{\phi 1}^n$ можно определить все остальные параметры РТ, в том числе удельный объем $v_{\phi 1}^n$ и удельную внутреннюю энергию $u_{\phi 1}^n$. Подвод тепла к РТ за счет разряда конденсаторной батареи и (или) сжигания горючих веществ приводит к увеличению давления РТ в первой ФК. Если в опыте не запланировано принудительное вскрытие диафрагмы (задержка вскрытия диафрагмы), то диафрагма, отделяющая первую ФК от остальной части газодинамического тракта установки, при повышении давления разрывается. После вскрытия диафрагмы РТ начинает истекать из первой ФК либо непосредственно в сопло (в случае отсутствия второй ФК), либо через дросселирующую решетку во вторую ФК. При отсутствии принудительного вскрытия диафрагмы в качестве начала рабочего режима $t = 0$ в установке принимается момент разряда конденсаторной батареи. При принудительном вскрытии диафрагмы в качестве начала рабочего режима принимается момент вскрытия диафрагмы.

Экспериментальные кривые $p_{\phi 1}(t)$ и $p_{\phi 2}(t)$ аппроксимируются полиномами степени n (для первой ФК — на отрезке $[t_1, t_2]$, для второй ФК — на отрезке $[t_3, t_4]$):

$$p(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n.$$

Для разных опытов и разных ФК степень полинома выбирается в диапазоне $n = 2 \div 14$. Для первой ФК (если отсутствует принудительное вскрытие диафрагмы) аппроксимация начинается после завершения переходных процессов в измерительном канале, т. е. при $t_1 = 1 \div 7$ мс. Затем полином экстраполируется на значение $t = 0$. Значение полинома, вычисленное при $t = 0$, соответствует давлению $p_{\phi 1}(0)$ в момент $t = 0$. В случае принудительного вскрытия диафрагмы аппроксимация начинается при $t \approx 0$ и значение $p_{\phi 1}(0)$ определяется с помощью измеренной зависимости $p_{\phi 1}(t)$ при $t = 0$ (см., например, рис. 8 в работе [3]). Для второй ФК аппроксимация начинается при $t_3 = 5 \div 15$ мс: промежуток времени $t = 0 \div t_3$ требуется для наполнения второй ФК. Считается, что при наличии второй ФК режим в рабочей части устанавливается в момент $t = t_3$.

После расширения РТ в сопле оно попадает в рабочую часть. Параметры РТ на срезе сопла считаются его параметрами в рабочей части установки.

Для вычисления параметров РТ с помощью последовательности состояний РТ в газодинамическом тракте установки используются следующие допущения.

1. Подвод тепла в первой ФК осуществляется при $v = \text{const}$: $v_{\phi 1}(0) = v_{\phi 1}^H$. При отсутствии задержки вскрытия диафрагмы ее разрыв происходит до окончания электрического разряда, т. е. в течение этого промежутка времени имеет место истечение РТ из первой ФК. Таким образом, при отсутствии задержки вскрытия диафрагмы часть подвода тепла осуществляется при $v \neq \text{const}$. При наличии задержки вскрытия диафрагмы процесс подвода тепла в первой ФК является изохорным. Допущение об изохорном процессе подвода тепла позволяет определять все параметры РТ в первой ФК в момент $t = 0$, в том числе удельную энтропию $s_{\phi 1}(0) = f(p_{\phi 1}(0), v_{\phi 1}(0))$, где $v_{\phi 1}(0) = v_{\phi 1}^H$, а также общее количество тепла, подводимого к РТ установки: $Q = V_{\phi 1}(u_{\phi 1}(0) - u_{\phi 1}^H)/v_{\phi 1}^H$ ($V_{\phi 1}$ — объем первой ФК).

2. К моменту вскрытия диафрагмы плотность и состав РТ выравниваются по всему объему первой ФК даже в экспериментах, в которых отсутствует задержка вскрытия диафрагмы после разряда конденсаторной батареи.

3. Если не учитываются потери тепла в стенки первой ФК $Q_w(t) = 0$, то считается, что процесс истечения из первой ФК является изоэнтропическим: $s_{\phi 1}(t) = s_{\phi 1}(0)$. Если $Q_w(t) > 0$, то процесс истечения рассматривается с учетом эмпирической зависимости $Q_w(t) = f(p_{\phi 1}(t), T_{\phi 1}(t))$, позволяющей определить уменьшение энтропии РТ $ds_{\phi 1}(t)$ за счет потерь тепла $Q_w(t)$ в стенки первой ФК [2]:

$$s_{\phi 1}(t + dt) = s_{\phi 1}(t) + ds_{\phi 1}(t).$$

По известным величинам $p_{\phi 1}(t)$ и $s_{\phi 1}(t)$ в течение рабочего режима определяются все остальные параметры РТ в первой ФК, в том числе удельная энтальпия $h_{\phi 1}(t)$.

4. Учитываются реальные свойства РТ в условиях энергетического и химического равновесия.

5. Процесс изменения параметров РТ во всем газодинамическом тракте установки является квазистационарным.

6. При наличии двух ФК процесс дросселирования в дроссельной решетке между ФК считается изоэнтальпийным: $h_{\phi 2}(t) = h_{\phi 1}(t)$. По известным величинам $p_{\phi 2}(t)$ и $h_{\phi 2}(t)$ определяются все остальные параметры РТ во второй ФК, в том числе удельная энтропия $s_{\phi 2}(t)$.

7. Перегрев РТ [4] при наполнении второй ФК (так же, как перегрев при наполнении паразитных объемов между первой ФК и критическим сечением сопла в случае отсутствия второй ФК) не учитывается.

8. Потери тепла в стенки второй ФК и сопла отсутствуют, т. е. процессы истечения РТ из второй ФК и течения в сопле являются изоэнтропическими: $s_H(t) = s_{\phi 2}(t)$. Энтальпия торможения равна $h_{0H}(t) = h_{\phi 2}(t) = h_{\phi 1}(t)$.

Конечной целью расчетов является определение параметров РТ в рабочей части установки по величинам $p'_0(t)$, $s_H(t)$, $h_{0H}(t)$.

Целью настоящей работы является оценка справедливости допущений, принимаемых для расчета параметров РТ, и верификация метода определения параметров РТ в рабочей части импульсной трубы ИТ-302М, основанного на изложенных выше предположениях. Суть метода исследования заключается в сравнении измеренной характеристики потока с ее расчетным значением. Отклонение расчетных характеристик от их измеренных величин служит оценкой точности определения параметров РТ в рабочей части установки.

2. Метод наполнения баллона. Сравняется масса воздуха $(G_6)_э$, наполнявшего в экспериментах за время t_6 баллон тарированного объема, с массой $(G_6)_р$, которая должна поступать в баллон за время t_6 при расчетных значениях скорости W_H и удельного объема v_H РТ в рабочей части установки.

В [3] описана конструкция пробоотборника, предназначенного для отбора из рабочей части высокоэнтальпийного газа, вытекающего из сопла установки. Пробоотборник удовлетворяет жестким условиям отбора пробы в установках кратковременного режима (синхронизация работы системы отбора с рабочим режимом установки, выбор момента времени запираания пробы в баллоне и т. д. [3]). Диаметр входного отверстия пробоотборника $d_0 = 5,46$ мм, объем баллона $V_6 = 572$ см³.

Опыты с использованием метода наполнения баллона проводились в следующих условиях: одинарная ФК (без дросселирующей решетки), режимы с мультипликатором или без мультипликатора, профилированное сопло с диаметром среза 300 мм, рассчитанное на число Маха на срезе $M_H = 8$, РТ установки — воздух, задержка вскрытия диафрагмы отсутствовала.

Рабочие параметры установки: $p_{\Phi 1}^H = 4 \div 7$ МПа, напряжение заряда конденсаторной батареи $U = 4,0 \div 4,5$ кВ, $p_{\Phi 1}(0) = 33,0 \div 36,5$ МПа, температура воздуха после разряда $T_{\Phi 1}(0) = 1200 \div 2280$ К.

На рис. 2 приведены типичные давления $p_{\Phi 1}(t)$ в первой ФК и $p'_0(t)$ на срезе сопла. Представлены результаты аппроксимации давления $p_{\Phi 1}(t)$, регистрируемого датчиком в первой ФК (кривая 2), с помощью двух полиномов при различных значениях n и t_1 (кривые 3, 4). Начиная с $t \approx 7 \div 10$ мс разные полиномы практически одинаково и достаточно точно аппроксимируют экспериментальную кривую $p_{\Phi 1}(t)$. Однако экстраполяция различных полиномов на начало режима $t = 0$ приводит к разным значениям $p_{\Phi 1}(0)$, что

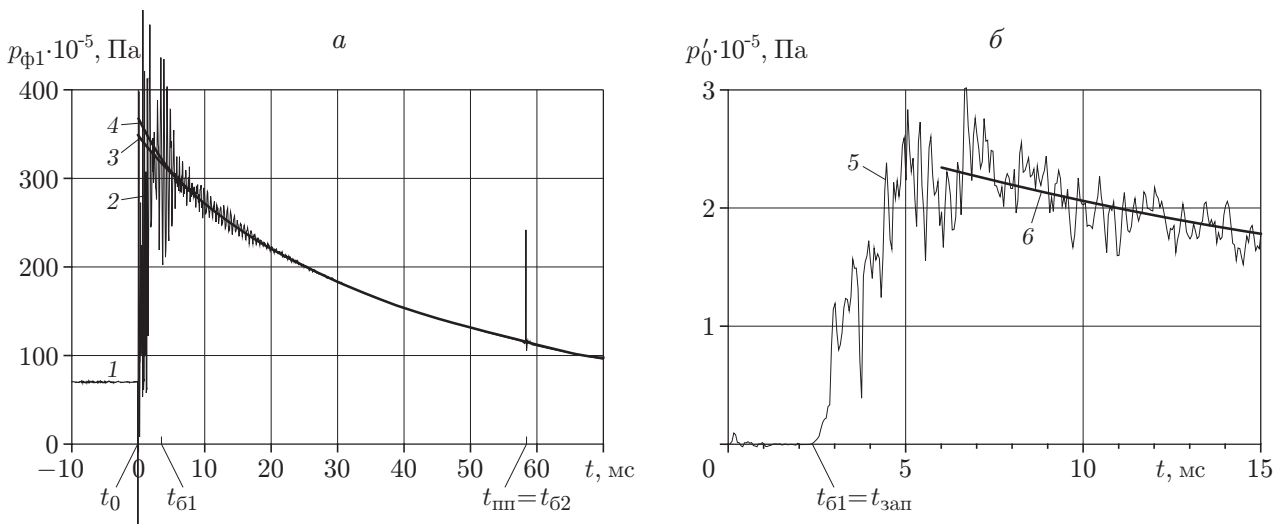


Рис. 2. Давления, регистрируемые в опыте 1406:

a — давление в первой ФК $p_{\Phi 1}(t)$, *б* — давление за прямым скачком уплотнения на срезе сопла $p'_0(t)$; 1 — давление накачки в первую ФК $p_{\Phi 1}^H$, 2, 5 — запись давления датчиками (2 — $p_{\Phi 1}(t)$; 5 — $p'_0(t)$); 3, 4, 6 — результаты аппроксимации измеренного давления полиномом (3 — $n = 5$, $t_1 = 5$ мс, $t_2 = 70$ мс, $p_{\Phi 1}(0) = 34,3$ МПа, $T_{\Phi 1}(0) = 1287$ К; 4 — $n = 6$, $t_1 = 1,2$ мс, $t_2 = 70$ мс, $p_{\Phi 1}(0) = 36,2$ МПа, $T_{\Phi 1}(0) = 1354$ К; 6 — $n = 4$, $t_3 = 6$ мс, $t_4 = 70$ мс); t_0 — начало режима ($t = 0$), $t_{пп} = t_{62} = 59$ мс — момент срабатывания пиропатрона клапана, $t_6 = t_{62} - t_{61}$ — время заполнения баллона РТ, $t_{зап} = 2,5 \div 3,0$ мс — время запаздывания $p'_0(t)$

определяет различие в течение рабочего режима таких параметров РТ, как температура, скорость и др. Иными словами, погрешность определения $p_{\phi 1}(0)$, обусловленная экстраполяцией на $t = 0$ полинома, справедливого, строго говоря, только на отрезке $[t_1, t_2]$, является одной из причин, приводящих к погрешности определения параметров РТ в установке.

На рис. 2,б видно, что существует задержка появления потока в рабочей части установки. Это время $t_{\text{зап}}$ требуется для прохождения потоком, возникающим в газодинамическом тракте установки после разрыва диафрагмы, расстояния между диафрагмой и срезом сопла, равного 1,75 м. В зависимости от значений $p_{\phi 1}^H$, U и точности выбора момента $t = 0$ в соответствии с кривой $p_{\phi 1}(t)$ время задержки составляет $2,5 \div 3,0$ мс. Моменту $t_{\text{пп}}$ подрыва пиропатрона клапана, служащего для закрытия баллона, соответствует момент t_{62} .

Перед запуском аэродинамической трубы проводится вакуумирование газодинамического тракта установки, за исключением ФК, которая отделена от тракта диафрагмой. При этом вакуумируется газовый тракт пробоотборника с баллоном, т. е. до начала режима РТ в баллоне отсутствует. В начале рабочего режима происходит заполнение баллона РТ. Время заполнения равно $t_6 = t_{62} - t_{61}$ (t_{61} , t_{62} — время начала и окончания заполнения баллона).

Регистрация давления p_6 , которое устанавливается в баллоне после его охлаждения до комнатной температуры, позволяет определить массу РТ, поступившего в баллон за время t_6 :

$$(G_6)_э = V_6/v_6 = V_6 p_6 / (RT_6).$$

Здесь v_6 — удельный объем РТ в баллоне после охлаждения до температуры $T_6 \approx 293$ К; R — удельная газовая постоянная РТ.

Расчетное значение массы воздуха, который должен поступить в баллон за время t_6 , определяется по формуле

$$(G_6)_р = \int_{t_{61}}^{t_{62}} \frac{W_H}{v_H} \varphi F_0 dt,$$

где F_0 — площадь входного отверстия в канале пробоотборника; φ — коэффициент расхода струи РТ, входящей в пробоотборник.

Используемые для расчета $(G_6)_р$ величины t_{61} , t_{62} , φ выбирались следующим образом. Поскольку поток начинает обтекать входное отверстие пробоотборника при $t \approx 3$ мс, в качестве момента начала втекания РТ в баллон принималось время $t_{61} = t_{\text{зап}} = 3$ мс. Оценки степени наполнения каналов пробоотборника от входного отверстия до баллона показывают, что возможное увеличение t_{61} за счет наполнения каналов не превышает десятых долей миллисекунды: изменение t_{61} на 1 мс приводит (при $t_6 = 40 \div 60$ мс и режимах работы установки без мультипликатора) к изменению значения $(G_6)_р$ приблизительно на 3 %. В качестве момента окончания втекания РТ в баллон принимался момент подрыва пиропатрона клапана $t_{62} = t_{\text{пп}}$. Оценки скорости движения клапана показывают, что возможное увеличение t_{62} составляет доли миллисекунды. Считалось, что $\varphi = 1$, так как согласно результатам киносъемки процесса обтекания передней части пробоотборника скачок, идущий от кромки входного отверстия, в течение времени t_6 был присоединен к входной кромке. После подрыва пиропатрона и запираания клапана заполнение баллона РТ прекращается, на входе в пробоотборник возникает выбитая ударная волна и пробоотборник начинает работать как трубка Пито: измеряемое в его каналах давление становится равным значению $p'_0(t)$, измеряемому на срезе сопла.

В табл. 1 приведены результаты экспериментов по измерению $(G_6)_э$ и расчету $(G_6)_р$. Величина $\delta = ((G_6)_р - (G_6)_э) / (G_6)_э$ характеризует отклонение расчетных значений от

Таблица 1

Результаты экспериментов по наполнению баллона в случае одинарной ФК при $M = 8$

Эксперимент									Расчет		
Номер опыта	$p_{\Phi 1}^H$, МПа	U , кВ	$p_{\Phi 1}(0)$, МПа	n	$t_1 - t_2$, мс	$(p_{\Phi})_{\text{э}}$, кПа	$(G_{\Phi})_{\text{э}}$, мг	$t_{\text{пп}}$, мс	$T_{\Phi 1}(0)$, К	$(G_{\Phi})_{\text{р}}$, мг	δ , %
Установка без мультипликатора											
1342	7,0	4,0	34,0	5	5 ÷ 120	15,6	106	46,6	1278	111	4,7
1343	7,0	4,0	34,4	5	5 ÷ 120	16,0	109	46,8	1290	110	0,9
1344	7,0	4,0	34,1	5	5 ÷ 120	17,6	119	55,4	1279	125	5,0
1345	7,0	4,0	33,1	5	5 ÷ 120	17,9	122	55,0	1240	129	5,7
1406	7,0	4,0	35,0	9	1,2 ÷ 120,0	19,0	129	59,0	1314	126	3,3
			34,3	4	5 ÷ 70				1287	133	3,1
1406	7,0	4,0	36,1	6	1,2 ÷ 70,0	19,0	129	59,0	1354	131	1,6
Установка с мультипликатором											
1400	7,0	4,0	36,2	6	4 ÷ 70	22,3	152	61,6	1355	160	5,3
1401	7,0	4,0	35,9	7	7 ÷ 70	23,0	156	61,4	1344	160	2,6
1402	7,0	4,0	36,5	7	5 ÷ 70	23,0	156	61,4	1368	162	3,8
1403	5,0	4,5	36,4	6	3 ÷ 70	18,3	124	62,0	1965	126	1,6
1404	4,0	4,5	33,3	5	3 ÷ 70	15,8	107	64,0	2285	110	2,8

экспериментальных. Анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет сделать следующие выводы.

Во всех опытах $(G_{\Phi})_{\text{р}} > (G_{\Phi})_{\text{э}}$. Постоянное превышение (систематическая ошибка) $(G_{\Phi})_{\text{р}}$ над $(G_{\Phi})_{\text{э}}$ объясняется в основном тем, что в расчетах коэффициент φ расхода струи, втекающей в пробоотборник, принимался равным единице. В действительности $\varphi < 1$ (незначительно), поскольку на кинограммах обтекания видно, что скачок, идущий от кромки входного отверстия, всегда присоединен к ней, а затупление кромки, обуславливающее значение $\varphi < 1$, не превышало 0,03 мм. Частично систематическая ошибка вызвана выбором значений $t_{\Phi 1} = 3$ мс, $t_{\Phi 2} = t_{\text{пп}}$.

Различие средних значений $(G_{\Phi})_{\text{р}}$ и $(G_{\Phi})_{\text{э}}$ практически одинаково и в опытах без мультипликатора (3,5 %), и в опытах с мультипликатором (3,2 %).

Неопределенность в восстановлении величины $p_{\Phi 1}(0)$, обусловленная в основном наличием переходных процессов, происходящих в измерительном канале $p_{\Phi 1}(t)$ при разряде конденсаторной батареи, и произволом при выборе момента времени t_1 начала аппроксимации, является одной из причин различия значений $(G_{\Phi})_{\text{р}}$ и $(G_{\Phi})_{\text{э}}$ (см. кривые 3, 4 на рис. 2, а и опыты 1345, 1406 в табл. 1).

Среднее отклонение $(G_{\Phi})_{\text{р}}$ от $(G_{\Phi})_{\text{э}}$ во всех опытах с наполнением баллона составляет 3,4 % (диапазон отклонения 0,9 ÷ 5,7 %), что является удовлетворительным результатом, если учитывать наличие систематической ошибки определения $(G_{\Phi})_{\text{р}}$. Среднеквадратичное отклонение составляет 0,43 %.

3. Измерение скорости потока с помощью метода PIV. Проведено сравнение измеренного с помощью метода PIV (particle image velocimetry) значения скорости W_{piv} в рабочей части в момент t_{piv} с расчетным значением скорости $W_{\text{н}}$ для этого момента. Панорамный метод бесконтактного измерения поля скоростей PIV основан на фиксации величины смещения в течение малого интервала времени микрочастиц, введенных в поток [5, 6]. Измерительной областью потока считается плоскость, подсвечиваемая световым ножом. Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены как минимум дважды. Образы частиц регистрируются на цифровую видеокамеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками

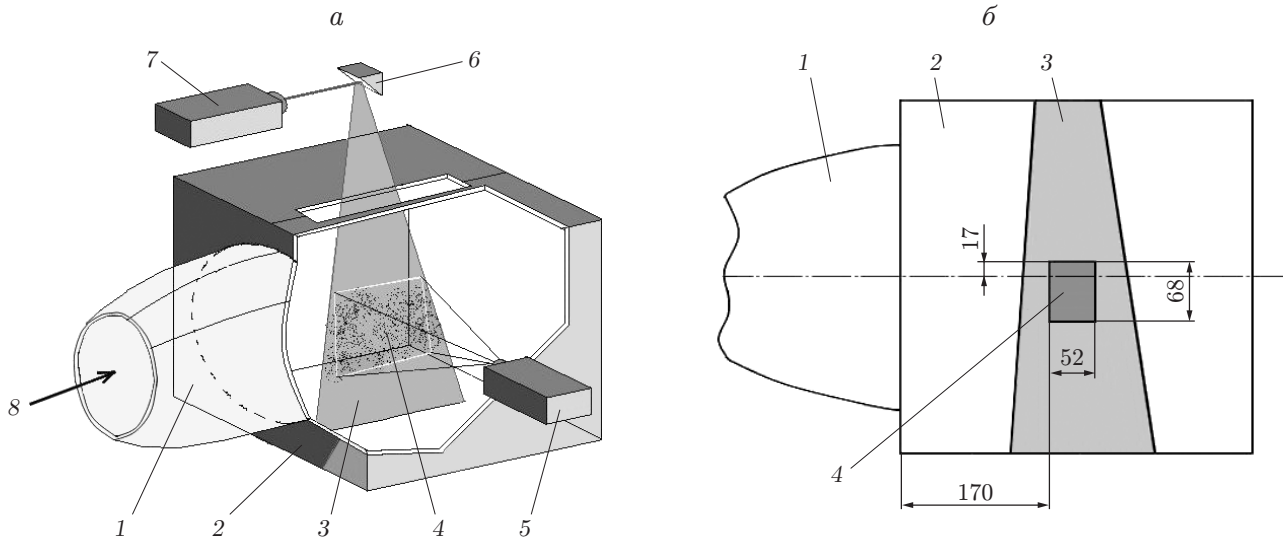


Рис. 3. Схема измерений методом PIV скорости потока в рабочей части аэродинамической трубы ИТ-302М:

a — расположение аппаратуры, *б* — область измерения скорости; 1 — сопло, 2 — рабочая часть, 3 — лазерный нож, 4 — область съемки камеры Hamamatsu C8484-52, 5 — камера Hamamatsu C8484-52, 6 — зеркало, 7 — лазер Litron NanoL135-15, 8 — направление движения ПТ установки

источника света и построить двухкомпонентное поле скоростей. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси аппаратуры, регистрирующей образы частиц.

Измерения методом PIV проводились с помощью измерительного комплекса фирмы Dantec Dynamics. Подсветка частиц осуществлялась импульсным твердотельным Nd:YAG-лазером Litron NanoL135-15 с длиной волны, равной 532 нм. Максимальная энергия в импульсе составляла 135 мДж, длительность вспышки — 4 нс, время задержки между вспышками — 1 мкс. Система линз создавала лазерный нож толщиной 1 мм с углом раствора, равным 20° . Плоскость лазерного ножа проходила через ось симметрии сопла установки.

Эксперименты проводились при естественном запылении микрочастицами потока, истекающего из сопла установки. Положение частиц фиксировалось камерой Hamamatsu C8484-52 (CCD-матрица с разрешением 1344×1024 пикселей и динамическим диапазоном 12 бит). Камера позволяла регистрировать два изображения с временной задержкой 1 мкс. Схема расположения аппаратуры и область измерений в потоке приведены на рис. 3.

Восстановление поля скоростей по изображениям трассеров осуществлялось с использованием кросс-корреляционных адаптивных алгоритмов с непрерывным смещением окна, однократным делением сетки и деформацией расчетной области [5]. Размеры элементарной области, в которой рассчитывался один вектор скорости, составляли 16×16 пикселей. Итоговое поле скоростей включало 166×126 векторов, фиксируемых камерой в прямоугольной области размером 68×52 мм (см. рис. 3).

Погрешность измерений методом PIV, в частности в аэродинамических установках, зависит от условий эксперимента, таких как размер частиц на изображении, их концентрация, скорость, градиент скорости [6, 7]. В соответствии с руководством по эксплуатации измерительного комплекса Dantec Dynamics для условий, соответствующих проведенным в ИТ-302М исследованиям, случайная погрешность измерений одного вектора скорости не

превышает 1,5 % и зависит в основном от выбранного алгоритма обработки. Для сравнения значений W_H с экспериментальными значениями скорости определялось среднеарифметическое значение W_{PIV} для всех измеренных в поле скоростей векторов. Вследствие большого количества векторов (приблизительно $2,1 \cdot 10^4$) случайная погрешность определения средней скорости W_{PIV} пренебрежимо мала.

Опыты с использованием метода PIV проводились в следующих условиях: одинарная (без дросселирующей решетки) или двойная ФК, режимы с мультипликатором или без мультипликатора, профилированные сопла с диаметром среза 300 мм, рассчитанные на числа Маха $M_H = 6; 8$, РТ установки — воздух, задержка вскрытия диафрагмы отсутствовала.

Рабочие параметры установки: $p_{\phi 1}^H = 4 \div 7$ МПа, напряжение заряда конденсаторной батареи $U = 4,0 \div 4,5$ кВ, $p_{\phi 1}(0) = 30 \div 36$ МПа, температура воздуха после разряда $T_{\phi 1}(0) = 1270 \div 2200$ К. Экспериментальные данные и расчетные значения приведены в табл. 2, 3. Величина $\varepsilon = (W_H(t_{PIV}) - W_{PIV})/W_{PIV}$ характеризует отклонение расчетных значений $W_H(t_{PIV})$ от экспериментальных W_{PIV} .

На рис. 4 приведена зависимость скорости РТ в рабочей части от времени рабочего режима. Расчетные значения скорости W_H определены с помощью двух аппроксимирующих полиномов, которым соответствуют различные значения $p_{\phi 1}(0)$. В зависимости от выбранного полинома расчетные значения скорости W_H могут как превышать измеренное значение W_{PIV} , так и быть меньше его: в разных опытах различие значений W_H и W_{PIV} не превышает нескольких процентов.

Кривые 1, 3 на рис. 4 рассчитаны без учета потерь тепла в стенки первой ФК, кривая 2 — с учетом тепловых потерь по методике, изложенной в [2]. Расчетам, выполненным без учета тепловых потерь в первой ФК, соответствует отсутствие нагрева стенки в течение рабочего режима. Для этих случаев расчета температура стенки первой ФК принималась равной $T_w = 293$ К (см. табл. 2, 3). В случае учета тепловых потерь температура T_w рассчитывалась в зависимости от величины $Q_W = f(p_{\phi 1}(t), T_{\phi 1}(t))$ [2] и полагалась переменной (см. табл. 2, 3). Сравнение кривых 2, 3 на рис. 4 показывает, что для конкретного опыта учет теплоотвода в первой ФК не приводит к существенному изменению расчетного значения W_H в момент t_{PIV} . Однако для опытов, в которых $T_{\phi 1}(0) > 1500$ К и $t_{PIV} > 50$ мс (рис. 5), т. е. когда потери энтальпии РТ в стенки первой ФК более существенны, учет потерь тепла приводит к существенному уменьшению расчетных значений W_H и, как правило, к уменьшению отклонения $W_H(t_{PIV})$ от W_{PIV} .

Из табл. 2, 3 следует, что в зависимости от параметров полинома n , t_1 , t_2 и учета или неучета в расчетах потерь тепла в первой ФК отклонения расчетного значения скорости $W_H(t_{PIV})$ от W_{PIV} составляют от $-3,5$ до $6,8$ %. Значения $W_H(t_{PIV})$ имеют отклонения в обе стороны, в отличие от результатов опытов по измерению $(G_6)_э$, в которых всегда $(G_6)_р > (G_6)_э$. При этом степень отличий $W_H(t_{PIV})$ от W_{PIV} в опытах с одинарной и двойной ФК, с мультипликатором и без мультипликатора при $M_H = 6; 8$ приблизительно одинакова и не превышает нескольких процентов. Средняя погрешность в опытах, выполненных с помощью метода PIV, составляла 0,65 % (по модулю 2,25 %), т. е. несколько меньше погрешности в опытах с наполнением баллона (3,4 %), что обусловлено наличием систематической ошибки при определении $(G_6)_р$. Однако среднеквадратичное отклонение значений ε близко к среднеквадратичному отклонению значений δ : 0,58 % для метода PIV и 0,43 % для метода наполнения баллона.

4. Выводы. В работе проведено сравнение расчетных характеристик параметров потока, вычисленных с учетом допущений, принимаемых для расчета параметров РТ в импульсных трубах, с экспериментально определенными значениями. Получены следующие результаты.

Таблица 2

Результаты экспериментов по определению скорости W_H с помощью метода PIV в случае одинарной ФК при $M_H = 8$

Номер опыта	Эксперимент						Расчет						
	$p_{\Phi 1}^H$, МПа	U , кВ	$p_{\Phi 1}(0)$, МПа	n	$t_1 - t_2$, мс	t_{PIV} , мс	$p_{\Phi 1}(t_{PIV})$, МПа	W_{PIV} , м/с	T_w , К	$T_{\Phi 1}(0)$, К	$T_{\Phi 1}(t_{PIV})$, К	$W_H(t_{PIV})$, м/с	ε , %
Установка без мультипликатора													
1409	7,0	4,0	34,0	7	3 ÷ 145	134,5	4,2	1142	—	1274	710	1164	1,9
1410	7,0	4,0	36,3	8	7 ÷ 145	35,3	17,0	1556	293	1338	737	1188	4,0
1415	7,0	4,0	35,3	7	2,8 ÷ 145,0	85,0	7,9	1274	—	1361	1133	1502	-3,5
1430	7,0	4,0	35,7	5	8 ÷ 100	33,8	17,9	1460	293	1322	870	1298	1,9
Установка с мультипликатором													
1412	7,0	4,0	36,3	8	1,2 ÷ 60,0	33,7	22,0	1546	293	1340	1104	1481	1,4
1413	5,0	4,5	34,1	5	3 ÷ 70	36,4	20,0	1850	—	1358	1204	1556	0,6
1414	4,0	4,5	32,1	5	1,2 ÷ 60,0	36,5	17,0	1995	—	1358	1172	1533	-0,8
										1840	1560	1794	-3,0
										2200	1818	1953	-2,1

Таблица 3

Результаты экспериментов по определению скорости W_H с помощью метода PIV в случае двойной ФК

Номер опыта	Эксперимент						Расчет						
	M_H	$p_{\Phi 1}^H$, МПа	U , кВ	$p_{\Phi 1}(0)$, МПа	t_{PIV} , мс	$p_{\Phi 1}(t_{PIV})$, МПа	$p_{\Phi 2}(t_{PIV})$, МПа	W_{PIV} , м/с	T_w , К	$T_{\Phi 1}(0)$, К	$T_{\Phi 1}(t_{PIV})$, К	$W_H(t_{PIV})$, м/с	ε , %
Установка без мультипликатора													
1362	6	6,00	4	35,4	20,6	17,20	5,82	1543	293	1573	1325	1583	2,6
1363	6	6,25	4	35,0	19,8	17,70	5,86	1599	293	1490	1272	1543	-3,5
1364	6	6,00	4	35,1	50,9	7,44	2,56	1389	293	1560	1074	1409	1,4
1367	6	4,50	4	29,2	81,8	12,60	0,99	1553	293	1768	1468	1659	6,8
1368	6	4,70	4	29,9	22,1	23,00	1,78	1785	293	1768	1356	1588	2,3
1428	8	7,00	4	36,3	39,3	24,20	6,98	1527	293	1730	1630	1769	-0,9
									—	1730	1586	1743	-2,4
									293	1361	1247	1563	2,4
									—	1361	1195	1535	0,5
Установка с мультипликатором													
1366	6	7,00	4	33,0	51,1	31,60	2,61	1510	293	1235	1242	1515	0,3

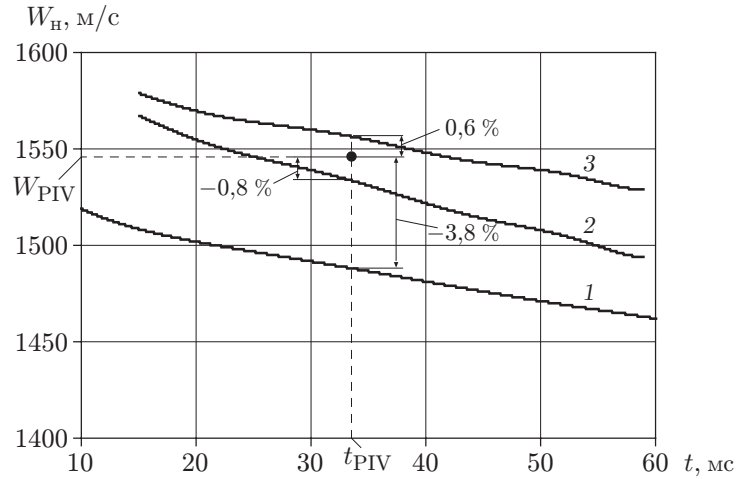


Рис. 4. Зависимость скорости W_n РТ в рабочей части от времени в опыте 1412 при $M_n = 8$:

1 — $n = 6$, $t_1 = 4$ мс, $t_2 = 70$ мс, $p_{\Phi 1}(0) = 32,5$ МПа, $T_{\Phi 1}(0) = 1218$ К (расчет без учета потерь тепла в стенки первой ФК ($T_w = 293$ К)); 2, 3 — $n = 8$, $t_1 = 1,2$ мс, $t_2 = 60$ мс, $p_{\Phi 1}(0) = 36,3$ МПа, $T_{\Phi 1}(0) = 1358$ К (2 — расчет с учетом потерь тепла в стенки первой ФК, 3 — расчет без учета потерь тепла в стенки первой ФК ($T_w = 293$ К)); $W_{PIV} = 1546$ м/с — скорость, измеренная методом PIV; $t_{PIV} = 33,7$ мс — момент, в который регистрируется скорость

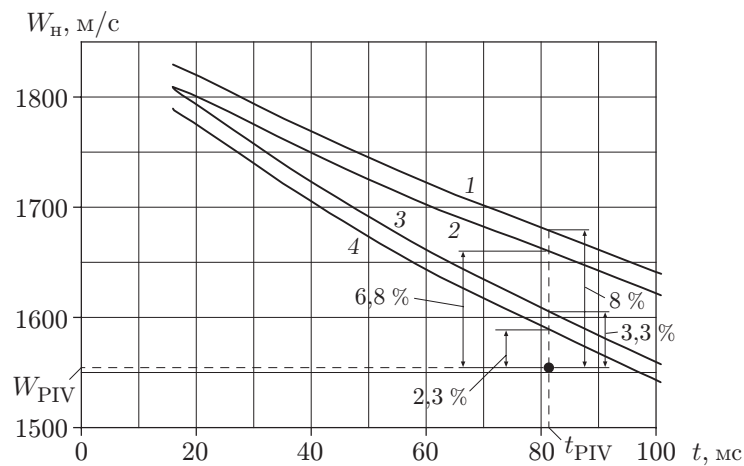


Рис. 5. Влияние потерь тепла в стенки первой ФК на скорость $W_n(t_{PIV})$ в опыте 1367 при $M_n = 6$:

1, 3 — $n = 6$, $t_1 = 5$ мс, $t_2 = 120$ мс, $p_{\Phi 1}(0) = 30$ МПа, $T_{\Phi 1}(0) = 1813$ К, 2, 4 — $n = 5$, $t_1 = 2$ мс, $t_2 = 120$ мс, $p_{\Phi 1}(0) = 29,2$ МПа, $T_{\Phi 1}(0) = 1768$ К; 1, 2 — расчет без учета потерь тепла в стенки первой ФК ($T_w = 293$ К), 3, 4 — расчет с учетом потерь тепла в стенки первой ФК; $W_{PIV} = 1553$ м/с — скорость, измеренная методом PIV; $t_{PIV} = 81,8$ мс — момент, в который регистрируется скорость

Различие измеренных двумя способами характеристик потока в рабочей части (расхода, определенного с помощью метода наполнения баллона, и физической скорости, определенной с помощью метода PIV) и их расчетных значений не превышает нескольких процентов.

Среднее отклонение $(G_6)_p$ от $(G_6)_э$ во всех опытах с наполнением баллона составляет 3,4 % (диапазон отклонения $0,9 \div 5,7$ %), что является удовлетворительным результатом, если учесть наличие систематической ошибки определения $(G_6)_p$.

Среднее для всех экспериментов отклонение расчетного значения W_n от измеренного W_{PIV} составляло 0,65 %. Значения W_n имеют отклонения в обе стороны, в отличие от результатов опытов по измерению $(G_6)_э$, в которых всегда $(G_6)_p > (G_6)_э$. Среднеквадратичное отклонение значений ε близко к среднеквадратичному отклонению значений δ : 0,58 % для метода PIV и 0,43 % для метода наполнения баллона.

Проведенные опыты показали, что предположения и допущения, принятые для определения параметров РТ в рабочей части, соответствуют процессам, происходящим в газодинамическом тракте импульсной трубы.

Наиболее существенное влияние на различие расчетных и экспериментальных значений оказывают два фактора: 1) неучет при $T_{ф1}(0) > 1500$ К и $t > 50$ мс потерь тепла от РТ к стенкам первой ФК; 2) неопределенность в восстановлении значения $p_{ф1}(0)$, которая получается за счет экстраполяции на $t = 0$ измеренных при $t > 3$ мс величин $p_{ф1}(t)$. Эта неопределенность устраняется путем принудительного вскрытия диафрагмы при $t > 5$ мс с начала разряда конденсаторной батареи, что приводит к завершению переходных процессов в первой ФК и измерительном канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумский В. В., Ярославцев М. И. Химический нагрев рабочего тела высокоэнтальпийной установки кратковременного режима // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 5. С. 31–43.
2. Ганимедов В. Л., Шумский В. В., Ярославцев М. И. Определение тепловых потерь и их влияние на параметры импульсных высокоэнтальпийных газодинамических установок // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 2. С. 209–219.
3. Шумский В. В., Ярославцев М. И. Состав рабочего тела в рабочей части высокоэнтальпийной установки // Физика горения и взрыва. 2012. Т. 48, № 1. С. 28–37.
4. Антохин В. М., Жохов В. А. Явление перегрева газа в импульсной аэродинамической установке // Учен. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1985. Т. 16, № 2. С. 41–49.
5. Токарев М. П., Маркович Д. М., Бильский А. В. Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скорости // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 3. С. 109–131.
6. Raffel M. Particle image velocimetry. A practical guide / M. Raffel, C. E. Willert, S. T. Wereley, J. Kompenhaus. Berlin: Springer, 2007.
7. Ахметбеков Е. К., Бильский А. В., Маркович Д. М. и др. Применение лазерного измерительного комплекса “ПОЛИС” для измерений поля скорости в сверхзвуковом потоке в аэродинамических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 342–352.

*Поступила в редакцию 16/XI 2011 г.,
в окончательном варианте — 19/I 2012 г.*