

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Типы жидкостных манометров	1
2. Приемники давления воздуха	4
3. Измерение скорости потока	8
4. Определение параметров воздушного потока	9
Литература	13
Приложение	14

Современный аэродинамический эксперимент предусматривает большой комплекс измерений параметров воздушного (газового) потока, обтекающего модель.

Одна часть этих измерений связана с исследованием возмущенного потока около модели или непосредственно на ее поверхности и позволяет установить аэродинамические характеристики обтекаемых тел (см., например, [2]).

Другая часть измерений связана с определением параметров невозмущенного набегающего потока. В этом случае большое значение имеют измерения давлений и скорости потока, а также определение поля скоростей в рабочей части аэродинамической трубы.

Для измерения давлений в воздушном потоке применяются жидкостные и механические манометры, а также электрические датчики давления: индуктивные, емкостные, тензометрические.

1. ТИПЫ ЖИДКОСТНЫХ МАНОМЕТРОВ

• Дифференциальный U-образный манометр (рис. 1) применяется обычно для измерения небольших перепадов давлений в воздушных средах.

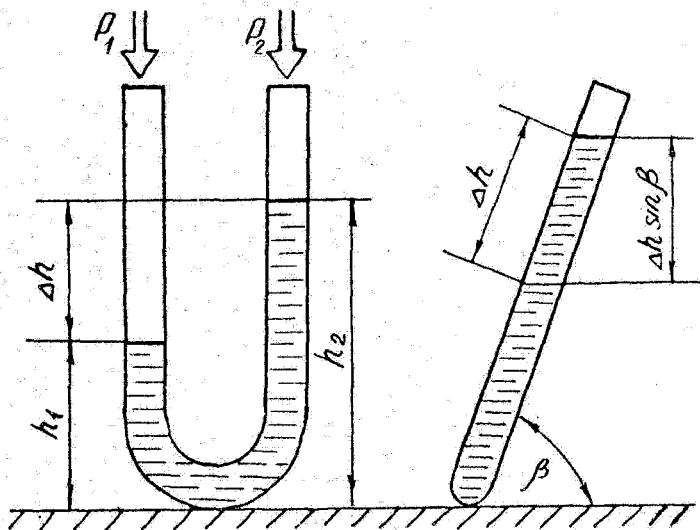


Рис. 1

Перепад давлений $p_1 - p_2$, подаваемых в отсчетные трубки манометра, уравнивается весом вертикального столба манометрической жидкости. При вертикальном расположении манометра этот перепад

$$p_1 - p_2 = (h_2 - h_1) \delta = \Delta h \delta, \quad (1)$$

а при наклонном

$$p_1 - p_2 = (h_2 - h_1) \delta \sin \beta = \Delta h \delta \sin \beta, \quad (2)$$

где δ — удельный вес жидкости, залитой в манометр.

Манометрические жидкости должны иметь устойчивую химическую структуру, малую вязкость, небольшую капиллярную постоянную, малый коэффициент объемного расширения. Обычно в жидкостных манометрах применяют спирт, ртуть или воду.

Наклон трубок манометра на угол β "растягивает" шкалу делений и тем самым увеличивает точность отсчета малых перепадов давления. Следует иметь в виду, что при малых углах β затруднителен отсчет из-за размытости мениска жидкости.

Чашечный микроманометр (рис. 2) позволяет ограничиться одним отсчетом (по трубке).

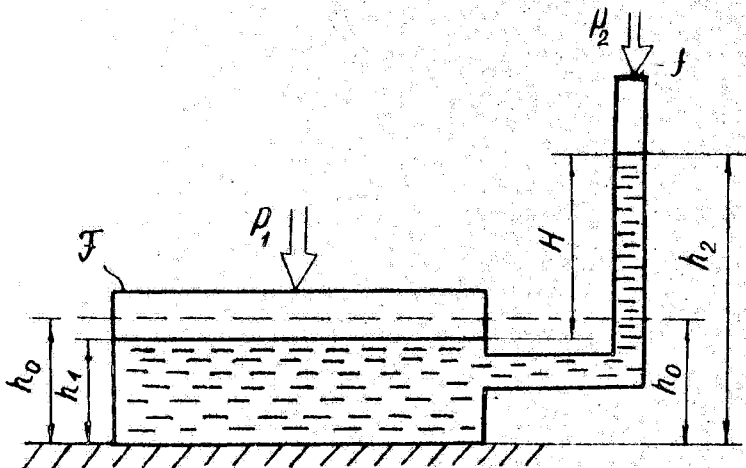


Рис. 2

Как и для U -образного манометра, в этом случае перепад давлений

$$p_1 - p_2 = H\delta = (h_2 - h_1)\delta. \quad (3)$$

Из условия равенства массы (веса) жидкости, вытесняемой из чашки и поступающей в трубку,

$$(h_0 - h_1)F\delta = (h_2 - h_0)f\delta, \quad (4)$$

где F - площадь поперечного сечения чашки, а f - площадь поперечного сечения трубки.

Отсюда

$$h_0 - h_1 = (h_2 - h_0) \frac{f}{F} \quad (5)$$

или, прибавляя слева и справа $(h_2 - h_0)$,

$$h_2 - h_1 = (h_2 - h_0) \left(1 + \frac{f}{F}\right). \quad (6)$$

Если выполняется условие $f/F \ll 1$, то $h_2 - h_1 \approx h_2 - h_0$ и вместо (3) пользуются формулой

$$p_1 - p_2 = (h_2 - h_0)\delta, \quad (7)$$

удобной в том случае, когда чашка манометра сделана из непрозрачного материала. Второе удобство заключается в том, что отсчет показаний манометра ведется по одной трубке.

Чашечный микроманометр с изменяемым наклоном трубки (рис. 3) измеряет перепад давлений

$$p_1 - p_2 = H\delta = (h + \Delta h)\delta. \quad (8)$$

Учитывая, что $h = l \sin \beta$ и $\Delta h F = l f$ или $\Delta h = l \frac{f}{F}$,

$$p_1 - p_2 = l \left(\sin \beta + \frac{f}{F} \right) \delta \quad (9)$$

Величина

$$K_1 = \sin \beta + \frac{f}{F} \quad (10)$$

определяется конструкцией прибора и наклоном трубки, а величина

$$K = K_1 \delta \quad (11)$$

является постоянной прибора для данной манометрической жидкости и угла наклона трубки.

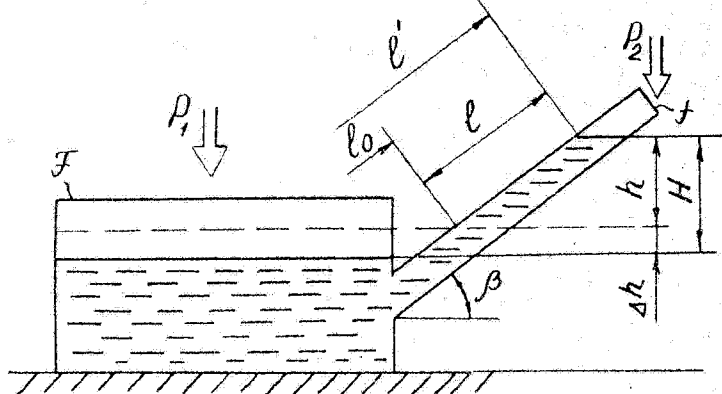


Рис. 3

Таким образом, расчетная формула для данного типа микроманометра

$$p_1 - p_2 = \kappa \ell, \quad (12)$$

где ℓ — перемещение жидкости по трубке микроманометра

$$\ell = \ell' - \ell_0; \quad (13)$$

здесь ℓ_0 — начальное положение жидкости в трубке;

ℓ' — положение жидкости в трубке при подведении к микроманометру давлений p_1 и p_2 .

Примечание. На микроманометрах рассматриваемого типа указываются вид рекомендуемой манометрической жидкости, ее удельный вес и соответствующие значения коэффициента κ для нескольких положений наклонной трубки. При этом ℓ измеряется в миллиметрах, а давление — в килограмм-силах на квадратный метр.

Как видно из формулы (9), чувствительность микроманометра с наклонной трубкой тем выше, чем меньше отношение f/F и чем меньше угол наклона трубки β .

2. ПРИЕМНИКИ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА

Движение несжимаемой жидкости (воздушного потока при скоростях меньше 60–100 м/с) характеризуется уравнением Бернулли вида

$$p + \frac{\rho V^2}{2} = p_0, \quad (14)$$

где ρ - статическое давление;

ρ_0 - полное давление, или давление торможения;

$$\frac{\rho V^2}{2} = \rho_0 - \rho$$

(15)

динамическое давление, или скоростной напор.

Для восприятия этих давлений с целью последующего их измерения с помощью манометров различного типа служат приемники давления [1].

На рис. 4 показана схема измерения избыточного статического давления в некоторой точке A потока с помощью статического зонда и микроманометра.

Простейшим приемником статического давления потока является стенка канала, где происходит течение воздуха, с дренажным отверстием, перпендикулярным поверхности стенки (рис. 5).

Приемник полного давления - трубка Пито представляет собой трубку с центральным каналом, открытым навстречу потоку. Схема измерения полного давления с помощью трубки Пито и микроманометра показана на рис. 6.

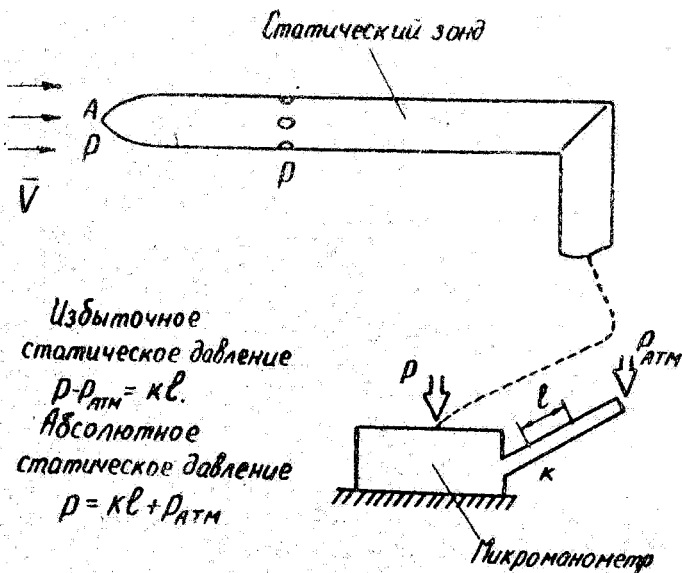


Рис. 4

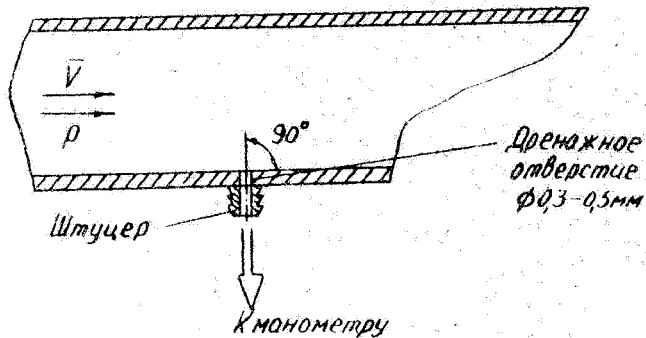


Рис. 5

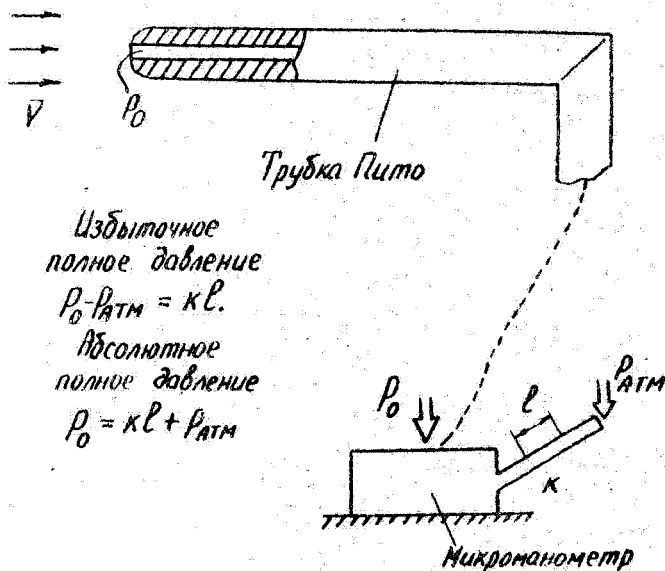


Рис. 6

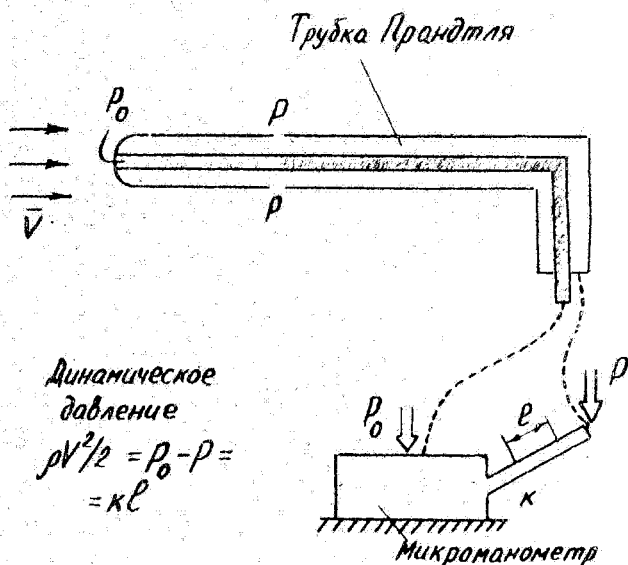


Рис. 7

В соответствии с формулой (15) для восприятия скоростного напора (динамического давления) применяется трубка Прандтля, представляющая собой комбинацию статического зонда и трубки Пито. Схема измерения скоростного напора с помощью трубки Прандтля и микроманометра показана на рис. 7.

В малоскоростных дозвуковых аэродинамических трубах с открытой рабочей частью давление в невозмущенном потоке ρ_{∞} равно атмосферному давлению $\rho_{атм}$, т.е. давлению в помещении, где расположена труба. Таким образом, избыточное полное давление $(P_0 - \rho_{атм})$, воспринимаемое трубкой Пито и измеряемое микроманометром, равно скоростному напору. Действительно,

$$\rho_{\infty} + \frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2} = \rho_{атм} + \frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2} = P_0, \quad (16)$$

откуда

$$\frac{\rho_{\infty} V_{\infty}^2}{2} = P_0 - \rho_{\infty} = P_0 - \rho_{атм}. \quad (17)$$

3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА

В методике измерения скорости потока существуют два приема. Первый может быть назван анемометрическим, второй - пневмометрическим.

Первый прием является способом непосредственного измерения скорости с помощью различного рода анемометров или термоанемометров. Электрический метод измерения скорости воздушного потока с помощью термоанемометра описан в [3].

При пневмометрическом методе скорость измеряется не непосредственно, а путем измерения давления, соответствующего измеряемой скорости. Как следует из вышесказанного, для этого могут использоваться трубка Пито или трубка Прандтля.

При использовании трубки Прандтля

$$\frac{\rho_{00} V_{\infty}^2}{2} = p_0 - p_{00}, \quad (18)$$

где $(p_0 - p_{00})$ - значение измеряемой величины, равное, в частности, при использовании микроманометра $\lambda \ell$, откуда

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{00}} (p_0 - p_{00})} \quad (19)$$

или

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{00}} \lambda \ell}. \quad (20)$$

При использовании трубки Пито

$$V_{\infty} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{00}} (p_0 - p_{0\text{Пит}})} = \sqrt{\frac{2}{\rho_{00}} \lambda \ell \cdot 9,81} \quad (21)$$

Если с помощью координатника, на котором установлена трубка Прандтля (или трубка Пито), перемещать ее поперек потока с определенным шагом, то можно найти распределение скорости в рабочей части аэродинамической трубы, т.е. определить поле скорости. Результаты соответствующих измерений и вычислений заносятся в табл. I, по данным которой выстраивается эпюра скорости воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы (рис. 8) и устанавливается область, в которой относительное изменение скорости не превышает 5-7%, называемая дросом потока.

Показания влажного термометра T', K	Разность показаний сухого и влажного термометров								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
278	0,79	0,60	0,43	—	—	—	—	—	—
279	0,80	0,61	0,45	0,31	—	—	—	—	—
280	0,81	0,63	0,48	0,35	—	—	—	—	—
281	0,81	0,65	0,50	0,37	—	—	—	—	—
282	0,82	0,66	0,52	0,40	0,29	—	—	—	—
283	0,83	0,68	0,54	0,42	0,32	—	—	—	—
284	0,84	0,69	0,56	0,45	0,34	—	—	—	—
285	0,84	0,70	0,58	0,47	0,37	0,28	—	—	—
286	0,85	0,72	0,60	0,49	0,39	0,30	—	—	—
287	—	0,73	0,61	0,51	0,41	0,33	—	—	—
288	—	0,74	0,63	0,53	0,43	0,35	0,28	—	—
289	—	0,75	0,64	0,54	0,45	0,34	0,30	—	—
290	—	0,76	0,65	0,56	0,47	0,40	0,33	—	—
291	—	0,76	0,66	0,57	0,49	0,41	0,35	0,29	—
292	—	0,77	0,67	0,59	0,51	0,43	0,37	0,31	—
293	—	0,78	0,68	0,60	0,52	0,45	0,38	0,33	0,27
294	—	0,79	0,69	0,61	0,53	0,46	0,40	0,35	0,29
295	—	0,79	0,70	0,62	0,55	0,48	0,42	0,36	0,31
296	—	0,80	0,71	0,63	0,56	0,49	0,43	0,38	0,33
297	—	0,81	0,72	0,64	0,57	0,51	0,45	0,40	0,35
298	—	0,81	0,73	0,65	0,58	0,52	0,46	0,41	0,36

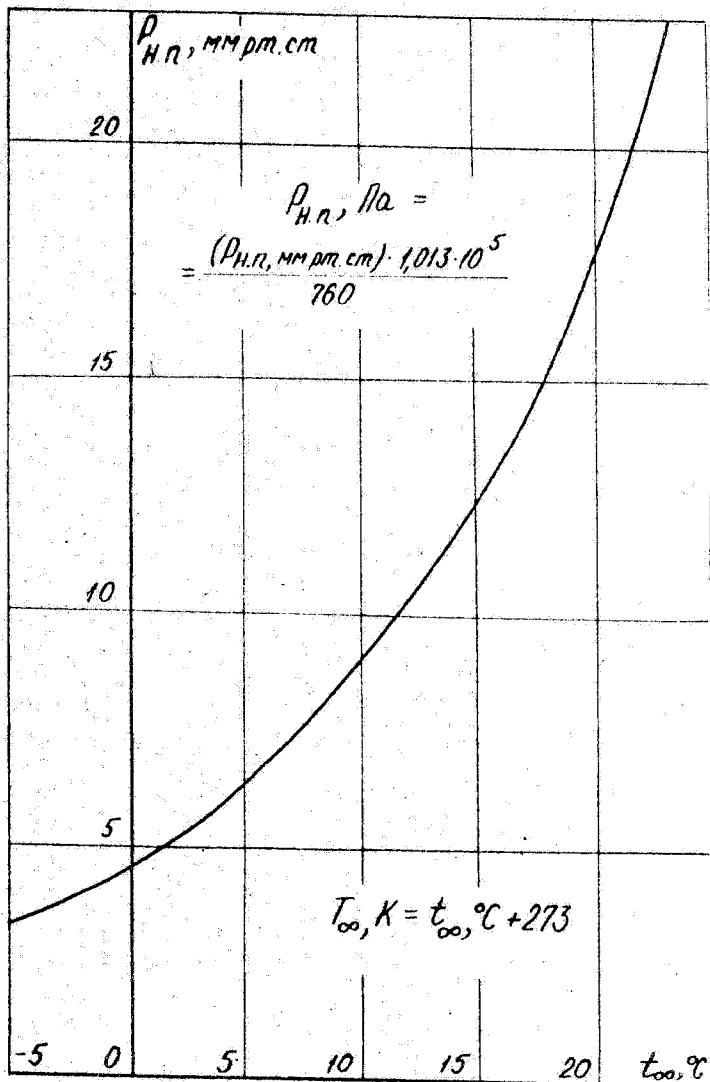


Рис. 9

Исходные данные:

Воздух: $R =$ Дж/(кг·К); $\kappa = c_p / c_v =$ микроанометр: $\kappa =$; $l =$ ммпсихрометр: показания влажного термометра $T' =$ К; относительная влажность $\chi =$; давление $p_{н.р} =$ Па

Параметры набегающего потока	Обозначение и размерность	Расчетная формула	Значение
Давление			
Температура			
Плотность			
Скорость			
Скоростной напор			
Динамическая вязкость			
Кинематическая вязкость			
Скорость звука			
Число Маха			
Число Рейнольдса			

С учетом влияния влажности

$$\rho_{\infty} = \rho_{\text{в.н.}} \cdot \frac{\rho_{\text{в.н.}}}{\rho_{\text{в.н.}}} \left(1 - 0,378 \frac{\lambda P_{\text{в.н.}}}{\rho_{\text{в.н.}}} \right), \quad (23)$$

где λ — относительная влажность воздуха, определяемая из табл. 2 по температуре, показанной влажным термометром, и по разности показаний сухого и влажного термометров в психрометре;

$P_{\text{в.н.}}$ — давление насыщенного водяного пара, определяемое из графика, приведенного на рис. 9, по температуре $t_{\infty}^{\circ}\text{C}$.

Динамическая вязкость воздуха

$$\mu_{\infty} = \mu_0 \left(\frac{T_{\infty}}{T_0} \right)^{0,76}, \quad (24)$$

где $\mu_0 = 1,789 \cdot 10^{-5}$ Па·с при $T_0 = 289$ К.

Результаты определения параметров воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы представляются в виде табл. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прикладная аэродинамика /Краснов И.А., Кошевой В.Н., Данилов А.Н. и др. — М.: Высшая школа, 1974. — 732 с.
2. Боровский Е.Э., Прохоров В.Н., Дьяконов М.Н. Определение аэродинамических характеристик профиля крыла в дозвуковом потоке: Методические указания к лабораторной работе по курсу "Гидроаэродинамика". — М.: МВТУ, 1980. — Часть I. Общие сведения. — 38 с.
3. Москаленко В.О., Хлущев А.И., Холоднов С.К. Термоанемометрические измерения параметров пограничного слоя на плоской пластине: Методические указания к лабораторной работе. — М.: МВТУ, 1978. — Часть I, — 14 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ниже приведен текст вычислительной программы расчета параметров воздушного потока в рабочей части дозвуковой малоскоростной аэродинамической трубы, составленной на языке ФОРТРАН-IV (в диалоговой версии) применительно к ЭВМ СМ-4.

1	2	3	4	5	6	7
C						
C						
						РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА
						PROGRAM KOTIA
						SUBROUTINE INT1(A,B,C,I,J,A1,B1,C1,Y)
						DIMENSION A(J), B(I), C(I,J)
						INTEGER S
						DO 1 K=1, J
						IF(A1 - A(K)) 3, 2, 1
1						CONTINUE
2						N = 0
						GO TO 4
3						N = 1
4						DO 5 L=1, I
						IF(B1 - B(L)) 7, 6, 5
5						CONTINUE
6						S = 0
						GO TO 8
7						S = 1
8						IF(N+S) 9, 10, 9

10 C1 = C(L, K)

GO TO 15

9 C1B1 = Y(C(L-1, K), C(L, K), B(L-1), B(L), B1)

C1A1 = Y(C(L, K-1), C(L, K), A(K-1), A(K), A1)

IF(N) 11, 12, 11

12 C1 = C1B1

GO TO 15

11 IF(S) 14, 13, 14

13 C1 = C1A1

GO TO 15

14 C1B2 = Y(C(L-1, K-1), C(L, K-1), B(L-1), B(L), B1)

C1 = Y(C1B2, C1B1, A(K-1), A(K), A1)

15 CONTINUE

RETURN

END

SUBROUTINE INT2(A, B, I, A1, B1)

DIMENSION A(I), B(I)

DO 1 K=1, I

IF(A1 - A(K)) 3, 2, 1

1 CONTINUE

2 B1 = B(K)

GO TO 4

3 B1 = Y(B(K), B(K-1), A(K), A(K-1), A1)

4 CONTINUE

RETURN

END

FUNCTION Y(YN, YN1, XN, XN1, X)

Y = YN1 + (YN - YN1) * (XN - XN1) / (XN - XN1)

RETURN

END

DIMENSION TD(9), TTU(21), TX(21, 9), TT(4), TDR(4)

EXTERNAL Y

REAL K, KT, L, MJU, NJU, MJUN, H

DATA TD/1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9/

DATA TTU/5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15,

* 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25/

DATA TX/79, 60, 43, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 80, 61, 45,

* 31, 0, 0, 0, 0, 0, 81, 63, 48, 35, 0, 0, 4, 0, 0, 81, 65,

* 50, 37, 0, 0, 0, 0, 82, 66, 52, 40, 29, 0, 0, 0, 0, 83,

* 68, 54, 42, 32, 0, 0, 0, 0, 84, 69, 56, 45, 34, 0, 0, 0, 0,

* 84, 70, 58, 47, 37, 28, 0, 0, 0, 85, 72, 60, 49, 37, 30,

* 0, 0, 0, 0, 73, 61, 51, 41, 33, 0, 0, 0, 0, 74, 63, 53,

* 43, 35, 28, 0, 0, 0, 75, 64, 54, 45, 37, 30, 0, 0, 0, 76,

* 65, 56, 47, 40, 32, 0, 0, 0, 76, 66, 57, 49, 41, 35, 29, 0, 0,

* 72, 67, 59, 51, 43, 37, 34, 0, 0, 78, 68, 60, 52, 45, 38, 33, 27,

* 0, 79, 69, 61, 53, 46, 40, 36, 29, 0, 79, 70, 62, 55, 48,

* 42, 36, 31, 0, 80, 71, 63, 56, 49, 43, 38, 33, 0, 81,

* 72, 64, 57, 51, 45, 40, 37, 0, 81, 73, 65, 58, 52,

* 46, 41, 36 /

DATA TT / 0, 10, 15, 30 /

DATA TDR / 4.579, 9.21, 12.79, 31.8 /

DO 16 I = 1, 4

TDR(I) = TDR(I) * 1.03E05 / 760.

16 TT(I) = TT(I) + 273.

DO 17 J = 1, 21

17 TTU(J) = TTU(J) + 273.

DO 18 I = 1, 21

DO 18 J = 1, 9

18 TX(I, J) = TX(I, J) / 100.

R = 287

K = 1.4

TYPE *, 'ВВЕДИТЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ В СИ:'

TYPE *, 'ТЕМПЕРАТУРА T = '

АССЕРТ *, T

```

TYPE *, 'ДАВЛЕНИЕ P = '
ACCEPT *, P
TYPE *, 'ТЕМПЕРАТУРА ВЛАЖНОГО ТЕРМОМЕТРА,
* 'TU = '
ACCEPT *, TU
TYPE *, 'ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ НОРМ',
* 'MJUN = '
ACCEPT *, MJUN
TYPE *, 'ТЕМПЕРАТУРА НОРМ TN = '
ACCEPT *, TN
TYPE *, 'ПОКАЗАНИЯ МИКРОМАНОМЕТРА: '
TYPE *, 'КОЭФФИЦИЕНТ КТ = '
ACCEPT *, КТ
TYPE *, 'ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТИ В ТРУБКЕ ',
* 'L (MM) = '
ACCEPT *, L
D = T - TU
OPEN(UNIT=1, NAME='KOT', TYPE='NEW')
CALL INT1(TD, TTU, TX, 21, 9, D, TU, X, Y)
CALL INT2(TT, TDR, 4, T, PN, Y)
RO = P * (1 - 0.378 * X * PN / P) / (R * T)
MJU = MJUN * (T / TN) ** 0.76
NJU = MJU / RO
Q = КТ * L * 9.81
U = SQRT(2 * Q / RO)
RE = U / NJU
A = SQRT(K * R * T)
M = U / A
WRITE (1, 10)
10 FORMAT(1H, 'ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ: ' / )
WRITE (1, 11) T, P, L, КТ, TU

```

```

11 FORMAT(1H, 'ТЕМПЕРАТУРА', 21X, 'T=', F5.1 /
* 1H, 'ДАВЛЕНИЕ', 24X, 'P=', E10.4 / 1H,
* 'ПОКАЗАНИЯ МИКРОМАНОМЕТРА:', 7X, 'L=', F5.1,
* 2X, 'KT=', F3.1 / 1H, 'ТЕМПЕРАТУРА ВЛАЖНОГО',
* 'ТЕРМОМЕТРА TU=', F5.1 /)
WRITE(1, 12)
12 FORMAT(1H, 'ТАБЛИЧНЫЕ ДАННЫЕ: ' /)
WRITE(1, 13) MUJN, R, K, TN, X, PN
13 FORMAT(1H, 'ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ',
* 'НОРМ', 6X, 'MUJN = ', E10.4 / 1H,
* 'ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ', 14X, 'R = ', F4.0 /
* 1H, 'ПОКАЗАТЕЛЬ АДИАБАТЫ', 13X, 'K = ', F3.1 /
* 1H, 'ТЕМПЕРАТУРА НОРМ', 16X, 'TN = ', F5.1 /
* 1H, 'ВЛАЖНОСТЬ', 23X, 'X = ', F4.2 /
* 1H, 'ДАВЛЕНИЕ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ', 8X,
* 'PN = ', E10.4 /)
WRITE(1, 14)
14 FORMAT(1H, 'РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ: ' /)
WRITE(1, 15) RO, MU, KJU, Q, U, RE, A, M
15 FORMAT(1H, 'ПЛОТНОСТЬ', 23X, 'RO = ', E10.4 /
* 1H, 'ДИНАМИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ', 11X, 'MU = ', E10.4 /
* 1H, 'КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ', 9X, 'KJU = ', E10.4 /
* 1H, 'СКОРОСТНОЙ НАПОР', 16X, 'Q = ', E10.4 / 1H,
* 'СКОРОСТЬ', 24X, 'U = ', F5.2 / 1H, 'ЧИСЛО РЕЙНОЛДА',
* 'CA', 16X, 'RE = ', E10.4 / 1H, 'СКОРОСТЬ ЗВУКА', 18X,
* 'A = ', F6.2 / 1H, 'ЧИСЛО МАХА', 22X, 'M = ',
* F5.3 /)
CLOSE (UNIT=1)
STOP
END

```

В программе приняты следующие обозначения:

$P = P_{\infty}$, $T = T_{\infty}$, $R = R$ (ГАЗОВАЯ ПОСТОЯННАЯ), $K = \kappa = c_p / c_v$,

$L = \ell$ (ПОКАЗАНИЕ МИКРОМАНОМЕТРА), $KT = \kappa$ (КОЭФФИЦИЕНТ МИКРОМАНО-

МЕТРА), $TU = T'$, $MJU = \mu$, $NJU = \nu$, $TN = T_0$, $MJUN = \mu_0$,

$PN = P_{H.П.}$, $Q = q = \rho V^2 / 2$, $U = V$, $RE = Re$, $A = a = \sqrt{\kappa RT}$,

$RO = \rho_{\infty}$, $M = M = V/a$, $X = x$ (ВЛАЖНОСТЬ)

С помощью оператора DATA в программу введены следующие данные:

Психометрическая таблица

$TD(9)$ - разность температур сухого и влажного термометров
[°C], $t_{\infty} - t'$;

$TTU(21)$ - температура влажного термометра [°C], t' ,

$TX(21,9)$ - относительная влажность X в %;

Зависимость $\rho_{H.П.} = f(t_{\infty})$

$TT(4)$ - температура $t_{\infty}^{\circ}C$, $TDR(4)$ - давление насыщенных паров $\rho_{H.П.}$, мм рт.ст.

В программе предусмотрен перевод температуры в градусы Кельвина, а давления - в паскалы.

Интерполяция психометрической таблицы с двумя входами оформлена в виде подпрограммы SUBROUTINE INT1, интерполяция таблицы $\rho_{H.П.} = f(t_{\infty})$ с одним входом - SUBROUTINE INT2.

Для упрощения записи формула линейной интерполяции

$$y(y_n, y_{n-1}, x_n, x_{n-1}, x) = y = y_{n-1} + \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} (x - x_{n-1})$$

оформлена как подпрограмма FUNCTION Y.

На рис. 10, 11 приведена блок-схема алгоритма программы интерполяции таблицы по двум входам (здесь $C(I, J)$ - таблица определяемых элементов; $A(J)$ и $B(I)$ - входы; необходимо определить C по известным A и B).

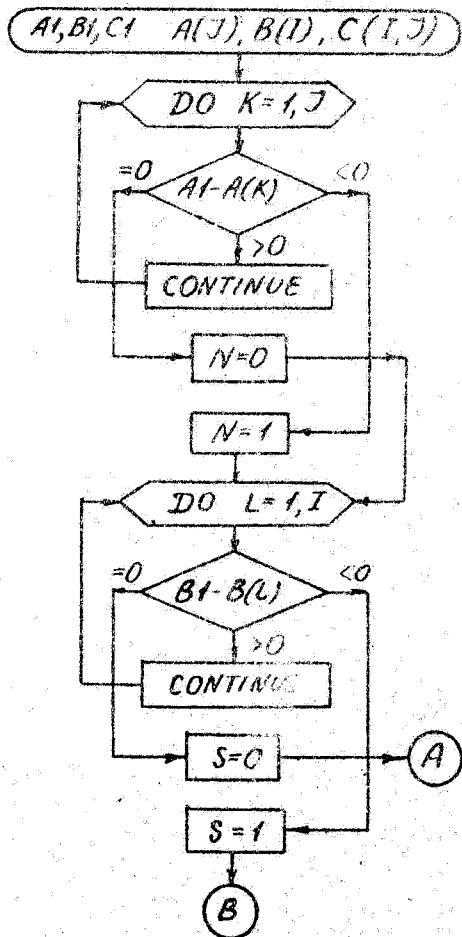


FIG. 10

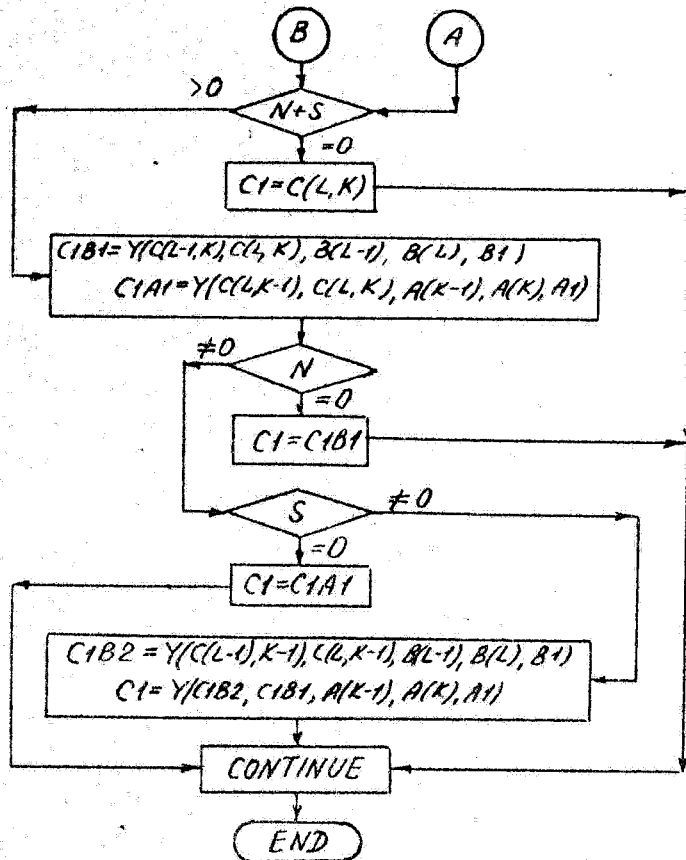


Рис. II