

4. Powe R. E., Carley C. T., Carruth S. L. A numerical solution for natural convection on cylindrical annuli. Paper Amer. Soc. Mech. Engng, 1970, No. WA/HT-9.
5. Любимова Т. П. О конвективных движениях неьютоновской жидкости в замкнутой полости, подогреваемой снизу. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 2.
6. Васин В. Г., Власюк М. П. О длинах волн двумерных конвективных движений в подогреваемом снизу горизонтальном слое жидкости. Препринт ИПМ, 1974, № 84.

УДК 532.5.032:532.574.2

ВЛИЯНИЕ ВЯЗКОСТИ НА ПОКАЗАНИЯ ТРУБОК ПОЛНОГО НАПОРА ПРИ МАЛЫХ СКОРОСТЯХ ПОТОКА

Н. П. МИХАЙЛОВА, Е. У. РЕПИК

(Москва)

Известно, что использование уравнений Бернулли при измерении скорости газового потока с помощью трубки полного напора справедливо только при больших числах Рейнольдса. При малых числах Рейнольдса действие сил вязкости, которые становятся соизмеримыми с инерционными силами, приводит к увеличению давления торможения P_0 по сравнению со значением, рассчитанным с использованием уравнения Бернулли, и коэффициент давления C_p должен быть больше единицы. В этом случае показания трубки полного напора будут зависеть как от числа Рейнольдса, так и от геометрической формы трубки. Влияние числа Рейнольдса и геометрии трубки полного напора на ее показания может иметь место в следующих практических случаях: а) при измерении очень малой скорости потока ($U < 1$ м/сек) или при измерении скорости в условиях течения очень вязкой жидкости; б) при измерении скорости в пограничном слое в непосредственной близости от стенки или в узких капалах с помощью очень малых трубок полного напора.

Имеющиеся теоретические решения [1, 2] и опытные данные [3-5] плохо согласуются между собой, что затрудняет их практическое использование. Наиболее тщательно влияние вязкости на показания цилиндрической трубки полного напора при малых скоростях потока было изучено в опытах [4, 5].

Однако опыты [4] плохо согласуются с опытами [5], хотя в обоих случаях исследовались трубки полного напора одной и той же цилиндрической формы с плоским срезом. Различие состоит лишь в том, что трубки полного напора имели разное отношение внутреннего диаметра d приемного отверстия трубки к наружному диаметру D . В опытах [4] отношение $d/D = \beta = 0.74$, а в опытах [5] оно было равным 0.6.

Можно предположить, что это различие в значениях β и явилось причиной расхождения значений C_p , полученных в [4, 5].

Безразмерный анализ указывает, что для цилиндрических трубок

$$(1) \quad C_p = C_p(\text{Re}, \beta)$$

Однако в литературе сведений о степени влияния β на показания трубки полного напора не имеется.

Следует также указать, что результаты опытов [4, 5] расходятся между собой не только количественно (значения $(C_p - 1)$ расходятся более чем в 2 раза), но и имеют разный характер зависимости C_p от числа Рейнольдса. Так, полученное в опытах [4] падение C_p ниже единицы в области изменения чисел Re_D от 60 до 1000 не было подтверждено более поздними опытами [5], в которых специально обращалось внимание на проверку этого несколько неожиданного результата. Более того, в [5] высказывается предположение, что падение C_p ниже единицы обусловлено методическими ошибками, которые имели место в опытах [4].

В настоящей статье приводятся опытные данные, способствующие уточнению имеющихся сведений по рассматриваемому вопросу и позволяющие установить причины указанных выше расхождений в результатах опытов [4, 5]. Для того чтобы выявить влияние β на значение C_p , исследовалась серия цилиндрических трубок полного напора с разными значениями β , в том числе и со значениями β , которые имели место в опытах [4, 5]. Размеры трубок приведены ниже:

№ трубки	D , мм	d , мм	β	№ трубки	D , мм	d , мм	β
1	1.0085	0.3065	0.304	6	0.8145	0.5525	0.678
2	1.0260	0.5040	0.492	7	1.4025	0.9750	0.699
3	1.0105	0.5975	0.592	8	0.8150	0.6020	0.738
4	0.5100	0.3070	0.602	9	1.0340	0.8160	0.789
5	1.5770	0.9570	0.607	10	1.603	1.3685	0.853

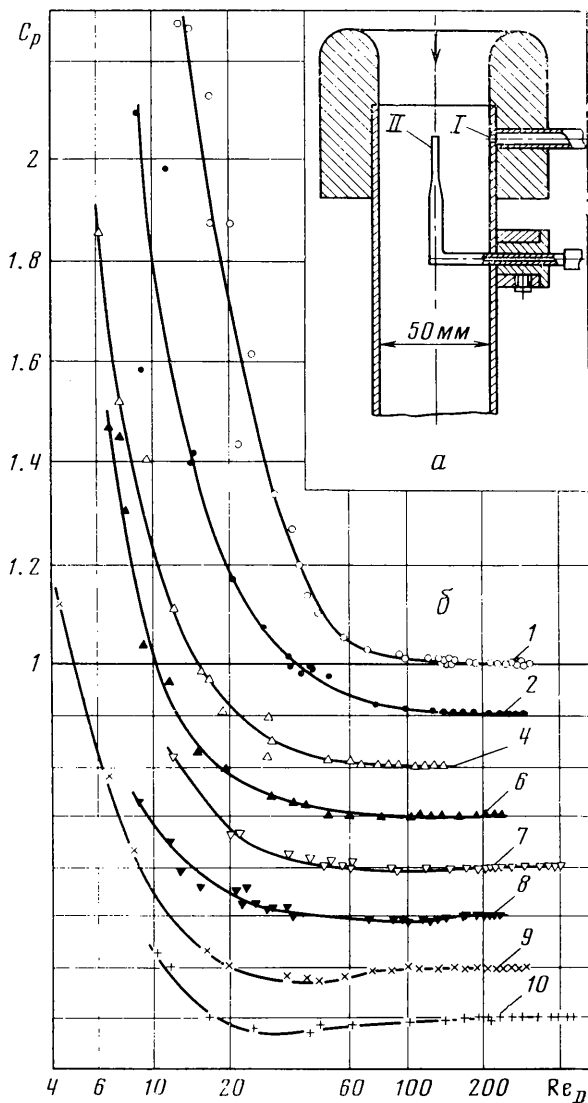
Экспериментальное определение значений C_p проводилось в вертикальной аэродинамической трубе (фиг. 1, а), принципиальная схема которой была аналогична схеме трубы, описанной в [5]. Забор воздуха в аэродинамическую трубу осуществлялся непосредственно из атмосферы с помощью вентилятора, установленного на выходе из рабочего канала трубы. Для расширения диапазона изменения скорости потока в рабочей части трубы, а следовательно, и числа Re была предусмотрена возможность установки лопаток рабочего колеса вентилятора под разными углами к набегающему потоку. Исследуемая трубка полного напора устанавливалась на оси аэродинамической трубы вблизи профилированного воздухозаборника вне пределов пограничного слоя, образующегося на стенках трубы. Оценка показала, что отклонение в значении скорости на оси аэродинамической трубы при установленной в рабочей части трубы трубке полного напора наибольшего диаметра и при ее отсутствии не превышало 0.25%.

Предполагалось, что на оси трубы $P_c + \frac{1}{2}\rho U^2 = P_a$, т. е. значение коэффициента давления равно

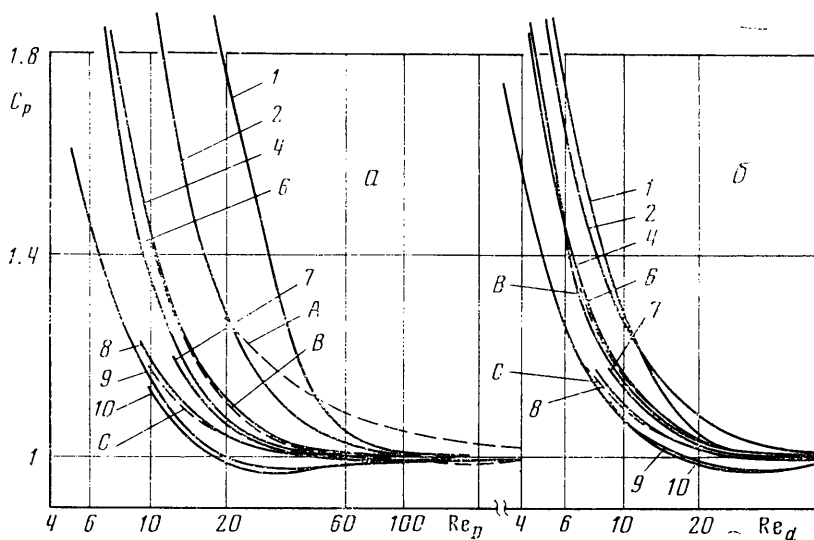
$$(2) C_p = \frac{P_0 - P_c}{\frac{1}{2}\rho U^2} = 1 + \frac{P_0 - P_a}{\frac{1}{2}\rho U^2}$$

Величина скорости потока U на оси трубы определялась по разности атмосферного P_a и статического P_c давлений. Давление P_c измерялось с помощью дренажного отверстия I диаметром 0.3 мм на стенке трубы, расположенного в одном измерительном сечении с приемным отверстием трубки полного напора I (фиг. 1, а). Малый перепад давлений ($P_0 - P_a$) и ($P_a - P_c$) регистрировался с помощью высокочувствительного спиртового манометра с ценою деления 0.003 мм вод. ст., в котором слежение за уровнем спирта, отсчет и регистрация показаний осуществлялись автоматически посредством фотодиодов, оптических линз и релейной схемы. Электрические сигналы фотодиодов подавались на входы ламповых усилителей в блоки автоматики, которые управляют перемещением кареток с фотодиодами в зависимости от уровня спирта. Измеряемый перепад давления регистрировался с помощью электромагнитного печатающего устройства.

Уменьшение случайной ошибки результата достигалось за счет большого числа отсчетов при одном измерении (не менее 10 отсчетов). Результаты измерений приведены на фиг. 1, б, где опытные значения C_p для трубок полного напора с разным отношением β представлены в зависимости от числа $Re_D = UD/2\nu$; здесь $U = \sqrt{2(P_a - P_c)/\rho}$. (На фиг. 1, б каждая из кривых 2–10 смещена по оси ординат вниз относительно кривой 1 на $(n-1) \cdot 10^{-1}$, где n — номер кривой.) Среднеквадратичные отклонения при определении зависимости C_p от Re_D по опытным данным при



Фиг. 1

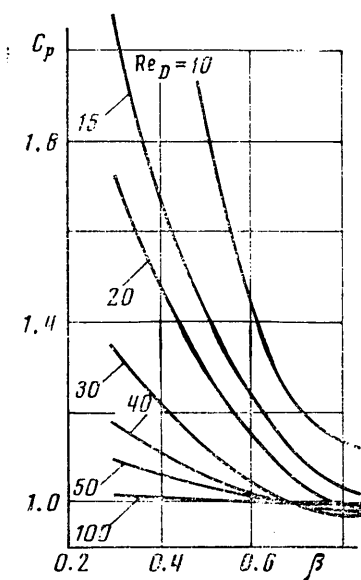


Фиг. 2

$C_p < 1.4$ не превышают $\sigma = 0.01$. На фиг. 1б, так же как и на всех других фигурах, цифры 1–10 обозначают номера трубок, приведенных выше.

Для более наглядной иллюстрации влияния β на характер зависимости C_p от Re_D на фиг. 2, а представлены сглаженные по опытным точкам кривые, приведенные на фиг. 1, б. Зависимость C_p от β при постоянном числе Re_D приведена на фиг. 3. Как видно, с уменьшением числа Рейнольдса коэффициент давления становится существенно больше единицы, при этом влияние вязкости проявляется более сильно для трубок с малым значением β , чем для тонкостенных трубок.

Зависимость значений C_p от β объясняет расхождение в значениях C_p , полученных в [4, 5]. Опыты [4, 5] (соответственно пунктирные кривые В и С на фиг. 2)



Фиг. 3

Другим важным результатом является получение значений $C_p < 1$ для трубок полного напора с $\beta > 0.6$. Диапазон изменения числа Рейнольдса, при котором имеет место $C_p < 1$, определяется значением β , при этом C_p растет с увеличением β . Падение

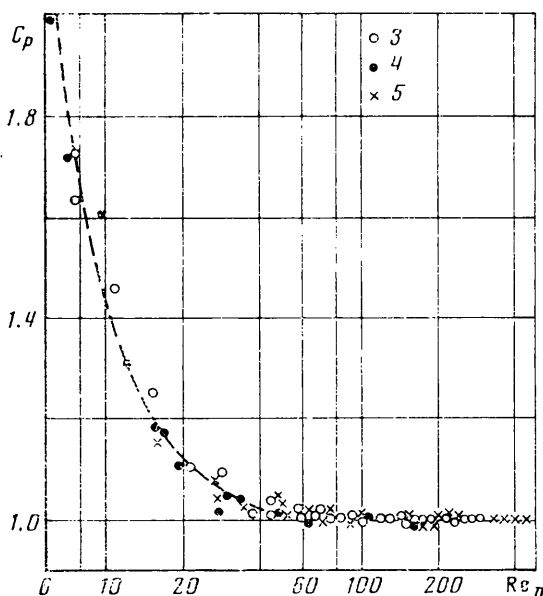
согласуются с настоящими опытами при тех же значениях β ; при этом следует подчеркнуть, что методика исследования, используемая в настоящих опытах и в опытах [4], была существенно разной. Здесь же приведена расчетная кривая А [1].

Опыты указывают на то, что при определении зависимости C_p от Re_D для цилиндрической трубки полного напора характерным геометрическим параметром является β , в то время как абсолютный размер наружного и внутреннего диаметра трубки, который в настоящих опытах изменялся примерно в 3 раза, практически не влиял на значение C_p при заданном числе Re_D (фиг. 4). Однако следует указать, что если значение числа Рейнольдса определять не по наружному диаметру трубки, а по внутреннему, то диапазон изменения C_p в зависимости от отношения β заметно сужается (фиг. 2, б), т. е. при исследовании вязкостного эффекта параметр $Re_d = Ud/2\nu$ является более универсальным, чем параметр $Re_D = UD/2\nu$.

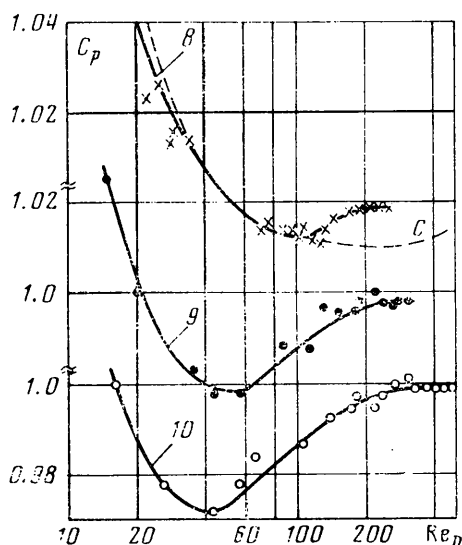
В случае цилиндрической трубки полного напора с $\beta = 0.6$, получившей наиболее широкое распространение в измерительной практике, можно предложить следующую эмпирическую зависимость:

$$(3) \quad C_p = Re_D [1.07 Re_D - 3.7]^{-1}$$

справедливая для $6 < Re_D < 30$, где значения C_p отклоняются от единицы более чем на 5% (см. пунктирную линию на фиг. 4).



Фиг. 4



Фиг. 5

значений C_p ниже единицы тем больше, чем больше значение β . С увеличением β минимум значений C_p смещается в сторону меньших чисел Re_D .

При $\beta=0.853$, которое являлось наибольшим в настоящих опытах, значение $C_p < 1$ имеет место при $17 < Re_D < 300$; при этом минимальное значение коэффициента давления равняется $C_{pmin}=0.972$ и соответствует числу $Re_D=40$. При $\beta \leq 0.6$ значений $C_p < 1$ не наблюдалось во всем рассмотренном диапазоне изменения чисел Re_D .

Если учесть, что величина падения C_p ниже единицы существенно превосходит разброс опытных точек (фиг. 5), а также то обстоятельство, что это падение C_p имеет вполне определенную закономерность по β и повторяемость от опыта к опыту, то это дает основание считать этот опытный факт вполне достоверным.

Таким образом, падение C_p ниже единицы, которое имело место в опытах [4] при $\beta=0.74$, не обусловлено методическими ошибками, как на это указывается в [5], а является закономерным. Однако диапазон изменения чисел Re_D , при которых в опытах [4] наблюдалось $C_p < 1$ (кривая C на фиг. 5), сдвинут в сторону больших чисел Re_D , чем это имеет место в настоящих опытах при том же значении β .

Строгое теоретическое обоснование этого явления не представляется возможным. Однако можно предположить, что обтекание трубки полного напора потоком вязкой жидкости приводит не только к очевидному с физической точки зрения росту значений C_p с уменьшением числа Re_D , но и одновременно способствует также снижению давления торможения в трубке за счет отсасывания жидкости из внутренней полости трубки эжектированием ее вязким потоком, обтекающим трубку. Последний эффект у тонкостенных трубок, естественно, должен проявляться в большей степени, чем у трубок с малым значением β , и в определенном диапазоне чисел Re_D (когда действие основного эффекта уже ослабевает) он и приводит к падению C_p ниже единицы.

Поступила 10 I 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Hamann F. The effect of high viscosity on the flow around a cylinder and around a sphere. NACA Tech mem. 1952, No. 1334.
2. W. F. Durand. Aerodynamic Theory. Vol. 3. Ed. Berlin, Springer, 1935.
3. Barker M. On the use of very small pitot - tubes for measuring wind velocity. Proc. Roy. Soc., ser. A., 1922, vol. 101, No. 712.
4. Hurd C. W., Chesky K. P., Shapiro A. H. Influence of viscous effects on impact tubes. J. Appl. Mech., 1953, vol. 20, No. 2.
5. McMillan F. A. Viscous effects on flattened pitot tubes at low speeds. J. Roy. Aeronaut. Soc., 1954, vol. 58, No. 528.