

## ВЕРИФИКАЦИЯ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ ТЕЧЕНИИ В ТРУБАХ ПО ИЗМЕРЕННОЙ МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

### АННОТАЦИЯ

Проведен анализ и верификация способов определения расхода при турбулентном течении в трубах по измеренным значениям максимальной скорости и перепаду давления на длине или только по измеренной максимальной скорости. Уточнено выражение для определения расхода с учетом опытного значения дефицита средней скорости.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Для практического определения расходов желательны способы, требующие минимального числа измеряемых параметров. С технической стороны это должны быть устройства, вызывающие минимальное сопротивление в потоке, так как при больших расходах сопротивление устройств требует дополнительных мощностей насосов. Рассматриваемый ниже способ и соответствующее устройство для измерения максимальной скорости практически не вызывает сопротивления в потоке, при этом увеличивается точность определения расхода.

### 2. СОДЕРЖАНИЕ

Проблема определения расхода при турбулентном течении в трубах с использованием измеренной максимальной скорости связана с неоднозначностью связи между максимальной и средней скоростями. В гидравлически гладких каналах происходит значительное "расслоение" профилей скорости с изменением числа Рейнольдса, а для неизменного числа Рейнольдса "расслоение" связано с изменением характера шероховатости [1]. Поэтому при получении выражения для определения расхода использованы зависимости для распределения скоростей, справедливые как для гладких, так и шероховатых труб. Они включают максимальную и динамическую скорости, поэтому исходим прежде всего из необходимости измерения максимальной скорости. Так как динамическая скорость  $u_*$  выражается через перепад давления  $\Delta p$  на длине  $L$  как

$$u_* = \sqrt{\frac{\Delta p a}{2L\rho}},$$

где  $a$  - радиус трубы, возникает необходимость в измерении перепада давления.

Таким образом, в отличие от существующих способов измерения расхода [2-4] повышение точности определения расхода может быть достигнуто за счет опосредованного учета действительного

профиля скорости в сечении трубы через измерение максимальной скорости и перепада давления на длине.

Первоначально, исходя из логарифмического распределения скоростей, справедливого как для гладких, так и шероховатых труб [1],

$$u = U_{\max} - 5.75u_* \lg\left(\frac{a}{a-r}\right), \quad (1)$$

интегрированием по текущему радиусу  $r$  найдено выражение для объемного расхода  $Q$  в трубе в виде [5]

$$Q_1 = \pi a^2 \left( U_{\max} - 2.6487 \sqrt{\frac{\Delta p a}{L\rho}} \right). \quad (2)$$

В другом случае выражение для расхода было найдено при использовании классического профиля Дарси в центральной части трубы (до  $0.6a$ ) [5]:

$$\frac{U_{\max} - u}{u_*} = 5.08 \left( \frac{r}{a} \right)^{3/2}, \quad (3)$$

а ближе к стенке - логарифмической зависимости (1). Получена аналогичная формула для расхода:

$$Q_2 = \pi a^2 \left( U_{\max} - 2.6503 \sqrt{\frac{\Delta p a}{L\rho}} \right). \quad (4)$$

Известно, что наиболее точно непрерывное распределение скоростей в трубах описывается формулой Рейхардта

$$\frac{u}{u_*} = 2.5 \ln \left( \frac{1.5(1 + 0.4y^+)(1 + R)}{1 + 2R^2} \right) + 7.8 \left[ 1 - e^{-\frac{y^+}{11}} - \frac{y^+}{11} e^{-0.33y^+} \right], \quad (5)$$

где  $R = \frac{r}{a}$ ;  $y^+ = \frac{(a-r)u_*}{\nu}$ .

После приведения (5) к виду  $\frac{U_{\max} - u}{u_*}$ , последующего выражения локальной скорости и интегрирования получено следующее выражение для расхода:

$$Q = \pi a^2 \left( U_{\max} - 2 \left( 2.06u_* + 95.44 \frac{v}{a} - 6.25 \frac{v}{a^2} \left( \frac{1.25v}{u_*} + a \right) \ln \left( 1 + \frac{0.4au_*}{v} \right) \right) \right). \quad (6)$$

Формулам (2) и (4) соответствует практически одинаковое значение "дефицита" средней скорости:

$$\frac{U_{\max} - u}{u_*} = 3.75.$$

Однако опытное определение дефицита средней скорости дает другое значение [1]:

$$\frac{U_{\max} - u}{u_*} \approx 4.08. \quad (7)$$

С учетом опытного значения дефицита средней скорости (7) легко получается формула для расхода в виде

$$Q_2 = \pi a^2 \left( U_{\max} - 2.885 \sqrt{\frac{\Delta p a}{L \rho}} \right). \quad (8)$$

После подстановки в формулу (4) известного выражения для перепада давления

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u_{\text{cp}}^2}{2},$$

где  $\lambda$  - коэффициент сопротивления трения, следует связь между средней и максимальной скоростью

$$u_{\text{cp}} = \frac{U_{\max}}{1 + 1.325\sqrt{\lambda}}, \quad (9)$$

что совпадает с зависимостью, приведенной в отечественных справочниках.

Из выражения для расхода (8) следует другая связь между средней и максимальной скоростями:

$$u_{\text{cp}} = \frac{U_{\max}}{1 + 1.443\sqrt{\lambda}}, \quad (10)$$

Различие формул (9) и (10) является принципиально важным, когда средняя скорость (а затем и расход) определяется только по измеренному значению максимальной скорости итерационным путем по " $\lambda$ " [5].

Для сравнения и верификации полученных формул расхода (2), (4), (6) и (8) были выполнены измерения максимальных скоростей и перепадов давления на стабилизированном участке турбулентного течения в трубе Ду50 длиной  $L=5.28\text{м}$  на стенде "Циркуляционная петля" кафедры "Теплофизика" ИАТЭ, где рабочей средой была вода. В табл. 1 приведены данные этих измерений.

Значения расхода, вычисленные по измеренным данным табл. 1, соответствующие формулам (4), и (8), сравнивались с расходами, найденными по формуле (6) как отвечающей наиболее точному профилю скорости.

Полученные результаты и относительная ошибка в % приведены в табл. 2.

Таблица 1. Экспериментальные значения максимальной скорости и перепада давления

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\max}$ , м/с	1.665	1.874	2.284	2.495	2.815	2.888	3.141	3.249
$\Delta p$ , Па	1471.0	2206.5	2942.0	3922.7	5148.5	4413.0	5638.8	6129.2

Таблица 2. Расчетно-экспериментальные значения расхода

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8
$Q$ , $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ по (6)	2.783	3.086	3.801	4.11	4.625	4.835	5.224	5.396
$Q_2$ , $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ по (4)	2.835	3.148	3.87	4.19	4.715	4.918	5.317	5.493
$\delta Q_2$ , %	1.874	1.999	1.836	1.925	1.931	1.724	1.781	1.791
$Q_3$ , $10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ по (8)	2.796	3.1	3.815	4.126	4.642	4.851	5.241	5.414
$\delta Q_3$ , %	0.481	0.461	0.394	0.385	0.364	0.336	0.329	0.325

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного анализа показывают, что наиболее точным выражением для определения расхода в круглых трубах по измеренным максимальной скорости и перепаду давления на длине является формула (8), а при определении расхода только по измеренной максимальной скорости (итерационным путем) следует использовать уточненную связь между средней и максимальной скоростями по формуле (10).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
- Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение, 1989.
- Авторское свидетельство СССР, №206850, кл. G01F1/37, 1967.
- Авторское свидетельство СССР, №317902, кл. G01F1/37, 1971.
- Авдеев Е.Ф., Большунова В.В., Виноградов А.В. Определение расхода по максимальной скорости и перепаду давления // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2000. №2. С. 51-56.