

Анализ влияния местных сопротивлений на погрешность измерения расхода в круглой трубе методом «площадь-скорость»

Шинелев А.А., Бурдунин М.Н., Артемов В.И., Яньков Г.Г.

С практической точки зрения интересна постановка и решение задачи о расчете величины дополнительной погрешности измерения расхода методом «площадь-скорость», связанной с отличием реального профиля скорости от теоретического стабилизированного профиля в бесконечно длинных гладких трубах. В другой формулировке та же задача звучит так: «какую длину прямолинейного участка трубопровода перед измерительным сечением необходимо обеспечить в зависимости от расположенных перед ним местных сопротивлений (диафрагм, диффузоров, конфузоров, колен и пр.), чтобы дополнительная погрешность не превышала заданной величины.

В настоящей работе рассматривается течение в круглой трубе диаметром 300 мм с интервалом средних скоростей на входе 0.1 – 10 м/с. Для описания состояния потока в трубе используется стационарная трехмерная система уравнений гидродинамики, записанная в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . Ось z направлена по оси трубы, r – радиус, θ – угол. Для моделирования турбулентного переноса импульса и тепла применяется k - ϵ модель турбулентности [1], основанная на дифференциальных уравнениях переноса для удельной кинетической энергии турбулентных пульсаций (k) и скорости диссипации турбулентной энергии (ϵ). Для расчета процессов гидродинамики в трубе использовался пакет прикладных программ Anes/NE [2]. Пакет предназначен для моделирования одно-, двух- и трехмерных течений однофазного или двухфазного теплоносителя в областях сложной геометрической формы, содержащих внутри твердые проницаемые или непроницаемые конструкции.

Диаметр трубы (D) не менялся, поскольку все определяется числом Рейнольдса $Re = u_0 D \nu$ и изменение диаметра можно смоделировать изменением средней скорости u_0 .

Исследовались два варианта:

- 1) Вариант «Диафрагма» - на расстоянии $5D$ от входа располагается кольцевая диафрагма толщиной 5 мм и диаметром проходного сечения $0.5D$. На входе в канал задаются стабилизированные профили скорости v_{z0} (и турбулентных характеристик).
- 2) Вариант «Закрутка» - на входе в канал задаются такие же стабилизированные профили и закрутка – тангенциальная скорость $u_\theta(r) = 0.5u_{z0}(r)$ которая затухает по длине канала.

Результаты моделирования

В качестве критерия стабилизации использовалась величина дефекта скорости (δ_v) – относительной разницы z -компоненты локальной скорости (v_z) и z -компоненты локальной скорости для стабилизированного профиля (v_{z0}) (далее по тексту, если речь идет о z -компонентах величин, индекс z может быть опущен):

$$\delta_v = 100\% \frac{(v_z - v_{z0})}{v_{z0}} = 100\% \frac{(v - v_0)}{v_0} \quad (1)$$

Дефект скорости дает оценку минимального значения дополнительной погрешности измерения расхода методом «площадь-скорость», связанной с искажениями

стабилизированного профиля, не учтенными в алгоритме расходомера. Действительно, пусть имеется прибор, в который заложен алгоритм:

$$G = u \cdot S = \alpha \cdot v \cdot S \quad (2)$$

где S , площадь сечения, α - коэффициент пропорциональности между локальной (v) и средней (u) скоростью потока, рассчитанный по стабилизированному профилю.

Коэффициент α является функцией числа Рейнольдса и относительного расстояния от стенки трубы до точки измерения скорости $y = Y/R$. В рассматриваемых вариантах стабилизированный профиль скорости известен. По табличным данным легко рассчитать $\alpha = u_0/v$. Умножив числитель и знаменатель (1) на αS получим:

$$\delta_v = 100\% \frac{(v\alpha S - v_0\alpha S)}{v_0\alpha S} = 100\% \frac{(G - G_0)}{G_0} = \delta_G \quad (3)$$

На рисунках 1 и 2 приведены графики дефекта скорости для вариантов «Диафрагма» и «Закрутка». Величина дефекта скорости отображена цветом. По оси X отложено расстояние вдоль оси трубы в калибрах, по оси Y – приведенное (к радиусу) расстояние от стенки трубопровода.

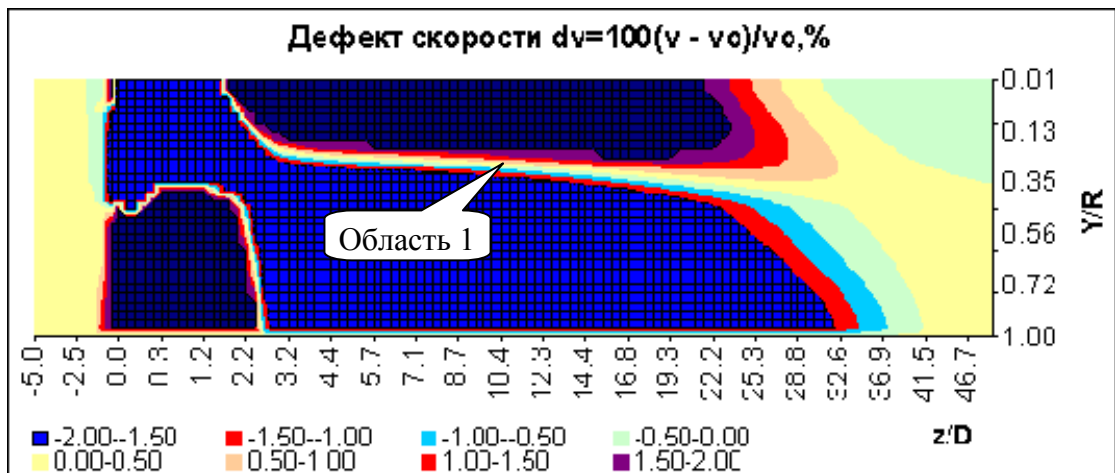


Рис.1. Расчет дефекта скорости для варианта «Диафрагма».

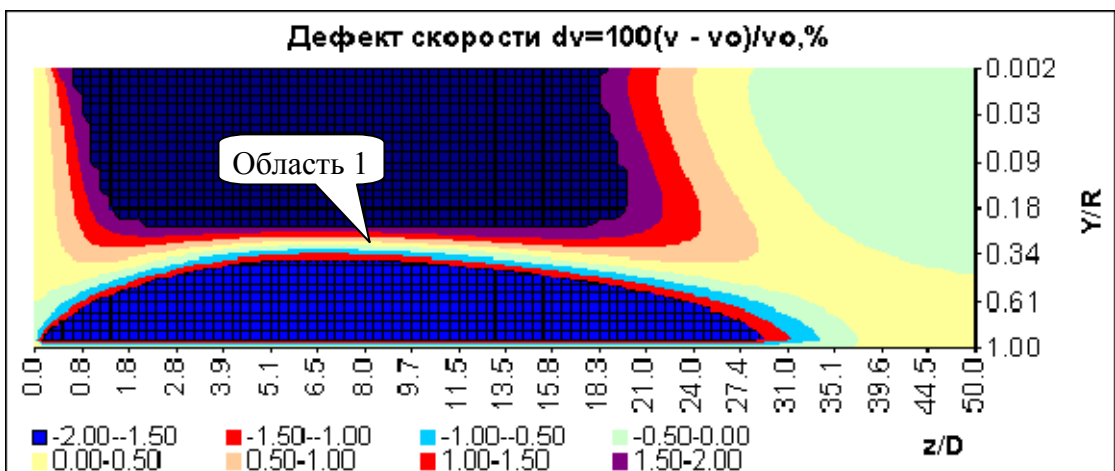


Рис. 2. Расчет дефекта скорости для варианта «Закрутка».

Если в качестве порога допустимого значения дополнительной погрешности взять $\pm 0.5\%$, то длина стабилизация профиля скорости во всем сечении трубы составит:

- в случае диафрагмы $\sim 37 \cdot D$
- в случае закрутки $\sim 35 \cdot D$

Однако обращает на себя внимание, что при измерении локальной скорости в точках $0.3 \cdot R \dots 0.35 \cdot R$ (см. «Область 1» на рисунках) значение дополнительной погрешности составляет величину меньше порога на значительно меньших расстояниях от местных сопротивлений.

В реальных измерениях число Re заранее неизвестно. Для его вычисления необходимо знать значение скорости и температуры. Поскольку в методе «площадь-скорость» измеряется локальная скорость, в алгоритм прибора α должен быть заложен в виде функции $\alpha = \alpha(v, y, t)$. В этом случае дополнительная погрешность по расходу уже не будет равна дефекту скорости:

$$\delta_G = 100 \frac{(\alpha(v, y, t)vS - \alpha(v_0, y, t)v_0S)}{\alpha(v_0, y, t)v_0S} = 100\% \frac{(v - v_0)}{v_0} + 100\% \frac{(\alpha - \alpha_0)}{\alpha_0} \frac{v}{v_0} \quad (4)$$

В современных расходомерах для вычисления α используют один из вариантов аппроксимации стабилизированного профиля скорости v_{0A} . Чаще всего уравнение для профиля скорости берут в виде [3, 4]:

$$v_{0A} = v_{Nik} = u \frac{(n+1)(2n+1)}{2n^2} \left(\frac{Y}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

откуда

$$\alpha_{Nik} = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \left(\frac{Y}{R} \right)^{-\frac{1}{n}} \quad (6)$$

На основании экспериментальным данных, полученных И. Никурадзе [5], показатель степени $n = n(Re)$ аппроксимируют полиномом от числа Рейнольдса (поэтому уравнение (5) часто называют «профиль Никурадзе»).

Используя (6) можно оценить значение дополнительной погрешности измерения расхода приборов с алгоритмом аппроксимации профиля скорости по Никурадзе:

$$\delta_{GNik} = 100\% \frac{(v\alpha_{Nik} - u_0)}{u_0} \quad (7)$$

На рисунках 3 и 4 приведены графики дополнительной погрешности для вариантов «Диафрагма» и «Закрутка». Как и на графиках δ_V , величина дополнительной погрешности δ_{GNik} отображена цветом. По оси X отложено расстояние вдоль оси трубы в калибрах, по оси Y – приведенное (к радиусу) расстояние от стенки трубопровода.

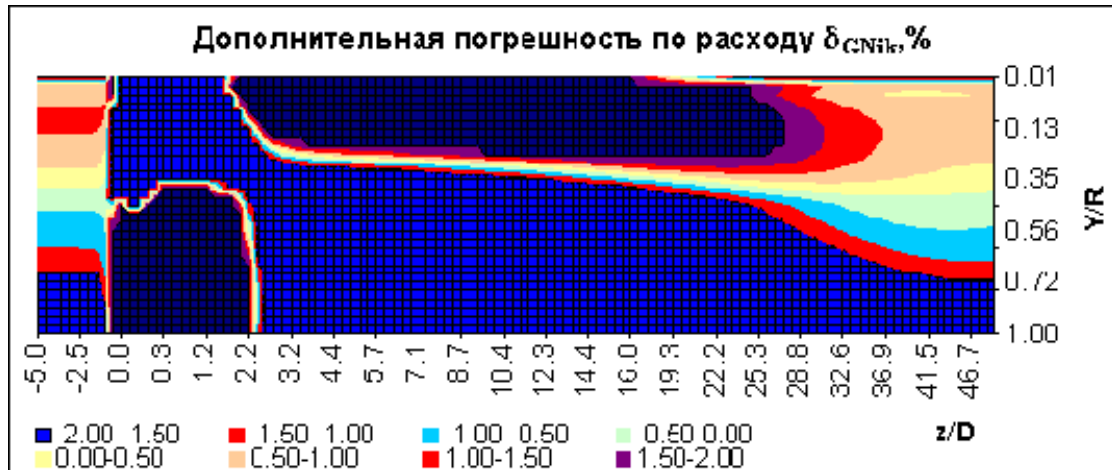


Рис.3. Расчет дополнительной погрешности для варианта «Дифрагма».

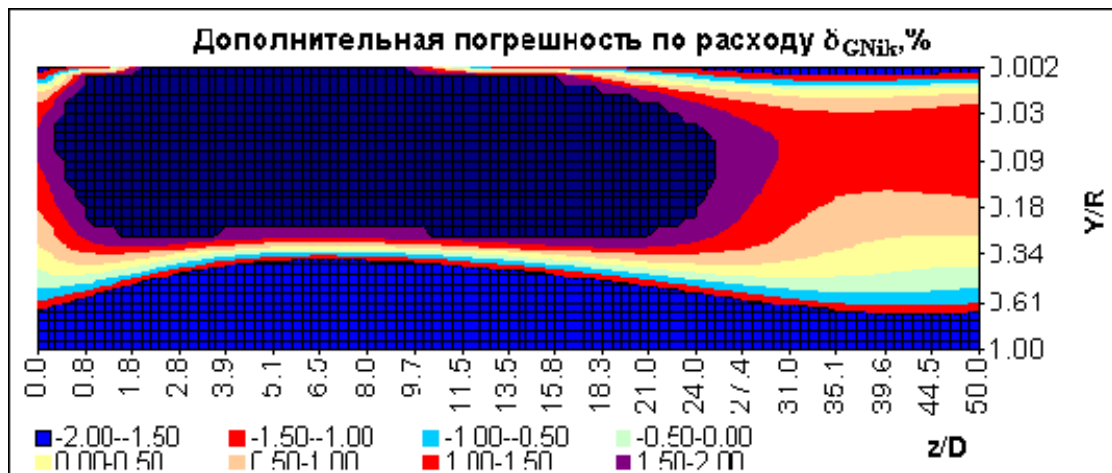


Рис. 4. Расчет дополнительной погрешности для варианта «Закрутка».

Видно, что из-за погрешности аппроксимации профиля скорости, дополнительная погрешность измерения расхода имеет приемлемую величину ($\pm 0.5\%$) в случае измерения локальной скорости в точках $0.2 \cdot R \dots 0.5 \cdot R$ на расстоянии более 30 калибров от местных сопротивлений. На меньших расстояниях зона с приемлемой погрешностью значительно сужается, но простирается в вверх по потоку практически до места внесения возмущения.

Таким образом, результаты моделирования стабилизации течения после введения диафрагмы или закрутки потока говорят о принципиальной возможности измерения расхода на малых расстояниях (менее 10 калибров) от местных сопротивлений.

Литература

1. В.Е. Launder. О расчете конвективного теплообмена в сложных турбулентных течениях// Современное машиностроение, серия А, 1989, № 9, с. 69-89.
2. ANES/NE : Пакет для численного моделирования процессов гидродинамики и тепломассообмена//Описание математических моделей пакета. Документация. 2002 г.
3. Теория пограничного слоя, Шлихтинг Г., перев. с немецкого, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», Москва, 1969.
4. И.Д. Вельт, Ю.В. Михайлова, Исследования электромагнитных расходомеров проливным и имитационными методами. Приборы, 2001, №7 (13).
5. Nikuradse J., Gesetzmässigkeit der turbulent Strömung in glatten Röhren. Forschg. Arb. Ing. – Wes., вып. 356 (1932).