

УДК 621.694.2

В.Е. САМОЙЛОВ, к.т.н. доцент (СамГТУ)
г. Самара

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА ПО РАЗРАБОТКЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ДВУХКАМЕРНОГО ПВЭ

При определении оптимальных соотношений элементов двухкамерного противоточного вихревого эжектора (ПВЭ) [4], обеспечивающих максимальную эффективность рабочего процесса эжектора, исследование параметров рабочего процесса проводилось как методом внешнего эксперимента, так и методом внутреннего эксперимента. Определение оптимальных соотношений ПВЭ проводилось с использованием методов планирования эксперимента.

Для оценки представительности результатов экспериментов существенное значение имеет оценка точности результатов измерений которая проводилась вероятностно статистическим методом согласно рекомендаций [1, 2]. При реализации опытов по плану эксперимента для определения параметров и характеристик ПВЭ использовались как прямые измерения (давление, разрежение, температура), так и косвенные (расход, скорости потоков).

Число измерений параметра равнялось $n=3$, а окончательный результат прямого измерения определялся как среднее арифметическое единичных измерений:

$$x_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

При расчёте была принята доверительная вероятность $P=0,95$.

Доверительная (случайная) погрешность рассчитывалась по формуле

$$\Delta x_{случ} = t \cdot S_{\Pi} \quad (2)$$

где $\Delta x_{случ}$ — доверительная погрешность; t — коэффициент (критерий) Стьюдента, определяемый по числу измерений и значению доверительной вероятности P по справочным данным [1]; S_{Π} — оценка среднеквадратичного отклонения среднего значения измеряемой величины от истинного значения определяется из уравнения

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{[n \cdot (n-1)]}} \quad (3)$$

При $\Delta x_{\text{сист}}/S_n < 0,8$, полная погрешность прямого измерения принималась равной случайной погрешности. При $\Delta x_{\text{сист}}/S_n > 0,8$, погрешность прямого измерения принималась равной систематической погрешности. При сравнимых величинах обеих погрешностей $0,8 < \Delta x_{\text{сист}}/S_n < 0,8$ полная абсолютная погрешность определялась по эмпирической формуле

$$\Delta x = k \cdot S_\Sigma \quad (4)$$

$$S_\Sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{i.\text{сист}}^2}{3}} + S_n^2 \quad (5)$$

$$k = \frac{\Delta x_{\text{случ}} + \Delta x_{\text{сист}}}{S_n + \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{i.\text{сист}}^2}{3}}} \quad (6)$$

где k — коэффициент, зависящий от соотношения случайной и систематической погрешностей; S_Σ — оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата прямого измерения; $\Delta x_{\text{сист}}$ и $\Delta x_{i.\text{сист}}$ — полная систематическая погрешность и ей составляющие.

$$\Delta x_{\text{сист}} = 1,1 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta x_{i.\text{сист}}^2} \quad (7)$$

Относительная погрешность измерения разряжения пьезометром:

$$\delta_p = \pm \frac{\Delta P}{X_N} \cdot 100 = \pm \frac{1}{760} \cdot 100 = \pm 0,13\%$$

где X_N — диапазон измерения величины разряжения.

Абсолютная погрешность измерения атмосферного давления по барометру $\Delta P_6 = \pm 0,25 \text{ мм.рт.ст.} (0,03 \text{ кПа})$.

Относительная погрешность

$$\delta_6 = \pm \frac{\Delta P_6}{760} \cdot 100 = \pm \frac{0,25}{760} \cdot 100 = 0,03\%$$

Суммарная относительная погрешность измерения разряжения:

— при использовании вакуумметра:

$$\delta'_{\Sigma P} = \sqrt{\delta_6^2 + \delta_6^2} = \sqrt{0,75^2 + 0,03^2} = 0,75\%$$

— при использовании пьезометра:

$$\delta''_{\Sigma P} = \sqrt{\delta_p^2 + \delta_6^2} = \sqrt{0,13^2 + 0,03^2} = 0,133\%$$

Систематическая погрешность измерения температуры определялась с учетом того, что измерительная цепь имеет три элемента (потенциометр ПП-63, хромель — копелевая термопара, термоэлектродные провода), а следовательно три источника-погрешности. Для потенциометра ПП-63 класса точности 0,05 со шкалой от 0 °С до 300 °С (градуировка ХК) в пределах основной абсолютной погрешности показаний при диапазоне измерений 22,88 мВ равны:

$$\Delta E_{\text{п.сист}} = \pm \frac{\delta E_{\text{п}}}{100} = \frac{0,05 \cdot 22,88}{100} \pm 0,01 \text{ мВ}$$

что соответствует абсолютной погрешности значения температуры $\Delta t_{\text{п.сист}} = 0,14^\circ\text{С}$. Допустимая погрешность градуировки хромель—копелевой термопары $\Delta E_{\text{т.п.сист}} = 0,14^\circ\text{С}$, что по шкале температур соответствует $\Delta t_{\text{т.п.сист}} = \pm 2,8^\circ\text{С}$. Допустимая погрешность стандартных удлиняющих проводов к хромель-копелевой термопаре $\Delta E_{\text{т.э.сист}} = 0,2 \text{ мВ}$ или $\Delta t_{\text{т.э.сист}} = \pm 2,8^\circ\text{С}$. Полная абсолютная систематическая погрешность измерения температуры определялась по формуле

$$\Delta x_{\text{сист}} = 1,1 \cdot \sqrt{0,14^2 + 2,8^2 + 2,8^2} = \pm 4,35^\circ\text{С}$$

Относительные систематические погрешности всех составляющих цепи измерения температуры при указанном диапазоне измерений $E_{\pi}=22,88$ мВ и возможных пределов измерения температуры до 200°C составили:

$$\delta_n = \pm \frac{\Delta t_{n.cucm}}{t} \cdot 100 = \pm \frac{0,14}{200} \cdot 100 = \pm 0,07\%;$$

$$\delta_{T.\pi} = \pm \frac{\Delta E_{T.\pi}}{E_{\pi}} \cdot 100 = \pm \frac{0,2}{22,88} \cdot 100 = \pm 0,87\%;$$

$$\delta_{T.\varepsilon} = \pm \frac{\Delta E_{T.\varepsilon}}{E_{\pi}} \cdot 100 = \pm \frac{0,2}{22,88} \cdot 100 = \pm 0,87\%;$$

Суммарная относительная систематическая погрешность измерения температуры составила:

$$\delta_T = \pm \sqrt{\delta_{\pi}^2 + \delta_{T.\pi}^2 + \delta_{T.\varepsilon}^2} = \pm \sqrt{0,07^2 + 0,87^2 + 0,87^2} = 1,23\%$$

Температура потока активного газа (атмосферный воздух) определялась по показаниям потенциометра и, в следствии этого, погрешность её измерения определялась систематической составляющей.

Измерение расхода активного и пассивного газа проводилось по перепаду давлений в камерной диафрагме.

$$G = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta p} \text{ кг/ч} \quad (8)$$

где α — коэффициент расхода диафрагмы; ε — поправочный коэффициент на расширение газа; d — диаметр отверстия диафрагмы, в мм, ρ — плотность измеряемого газа, кг/м^3 ; Δp — перепад давлений, определяемый по жидкостному пьезометру Па.

При измерении расхода газа общая погрешность измерения складывается из погрешностей определения величин, входящих в уравнение расхода. Оценка точности измерений проводилась по средней квадратичной относительной погрешности [3].

В уравнение расхода входят две категории величин. К первой категории относятся величины, найденные путем обработки большого числа данных α , ε , ко второй, величины измеряемые, как правило, однократно d , ρ , T , Δp . Для величин этой группы известны средние квадратичные и предельные погрешности, и для них справедлив закон сложения средних погрешностей. Для второй категории величин известны максимальные погрешности

однократного измерения, сюда относятся и величины находимые по справочным данным.

При анализе результатов было сделано допущение при котором предельную погрешность, ряда измерений принимали равной максимальной погрешности однократного измерения при доверительной вероятности $P=0,95$ (95%) [3]. Погрешность определения коэффициента расхода σ_α и поправочного множителя на расширение измеряемой среды σ_ε рассчиталась с использованием номограмм и рекомендаций [3] и составляют $\sigma_\alpha = 0,71\%$, $\sigma_\varepsilon = 0,65\%$. Абсолютная, погрешность при определении перепада, олений по дифманометру заполненному водой не превышает $\Delta=\pm 2$ мм. При среднем перепаде давления $\Delta p_{cp}=350$ мм.вод.ст средняя квадратичная погрешность равна:

$$\sigma_{\sqrt{\Delta p}} = \pm \frac{\Delta \cdot 100}{2 \cdot \Delta p_{cp}} = \frac{2 \cdot 100}{2 \cdot 350} = 0,28$$

Средняя квадратичная относительная погрешность определения плотности газа составляет σ_ρ %. [3]. Средне квадратичная погрешность измерения расхода определялась по формуле:

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2 + \frac{1}{4}\sigma_\rho^2 + 4\sigma_d^2}$$
$$\sigma_G = \sqrt{0,71^2 + 0,65^2 + 0,28^2 + \frac{1}{4} \cdot 0,1^2 + 4 \cdot 0,1^2} = 1,02\%$$

Список литературы

1. Зажигаев Л.С., Кишьян А.Л., Романиков Ю.М. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. — М.: Атомиздат, 1978, 232 с.
2. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. — М.: Машиностроение, 1981. —182 с.
3. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными суживающими устройствами. РД 50-213-80. — М.: Стандарт, 1982. — 319 с.
4. Самойлов В.Е. Совершенствование конструкции противоточного вихревого эжектора с целью повышения эффективности его работы. Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, — Кемерово / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т». ;—2017

Информация об авторе:

Самойлов Валерий Евгеньевич, к.т.н., доцент, СамГТУ, 443100 г.
Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244 СамГТУ кафедра ТЭС, E-mail ка-
федры tes@samgtu.ru, E-mail автора samoilov-v@rambler.ru