**УДК 533.17**

# ПРОГРАММА ДЛЯ ПОСТОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ В СЕЧЕНИЯХ ПОТОКА ГАЗОВЫХ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ

**И.А. Лысак[1,2], В.И. Звегинцев[3], Г.В. Лысак[1]**

[1] Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томский государственный университет
[2] Институт кибернетики
Томский политехнический университет
г. Томск
[3] Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
г. Новосибирск

Статья посвящена созданию программы, осуществляющей постобработку данных первичного измерительного преобразователя полного давления, накопленных при прямом и обратном его проходе в плоскости поперечного сечения потока, создаваемого газовыми струйными аппаратами.

**Ключевые слова:** газодинамический устройства, газоструйные аппараты, трубка Пито, контроль поля скоростей, свободная струя.

Газодинамические устройства нашли широкое применение в самых разных областях науки, техники и народного хозяйства [1,2]. В последнее время все большее внимание уделяется струйным аппаратам благодаря простоте схем их включения в различные установки наряду с исключительной простотой конструкции, а также несложностью их изготовления [3,4]. Вместе с тем не теряет актуальности задача экспериментального контроля параметров газовых потоков, генерируемых в результате работы многих из этих устройств. Бесконтактные методы [5,6] обычно применяют для контроля смешанных потоков, содержащих аэрозоли, в остальных случаях, как например в [7], используют контактные (зондовые) методы благодаря их простоте и надежности. Однако даже контроль полей скоростей и давлений газовых потоков с их использованием связан с обработкой огромных массивов экспериментальных данных. Таким образом, для снижения трудоёмкости этого процесса, целью настоящей работы являлось создание программы, осуществляющей постобработку данных первичного измерительного преобразователя полного давления, накопленных при прямом и обратном его проходе в плоскости поперечного сечения потока, создаваемого газовыми струйными аппаратами.

При разработке алгоритма программы принято, что контроль скорости газового потока, свободно истекающего из сопла газового струйного аппарата (ГСА), осуществляется контактным (зондовым) методом с использованием напорной трубки Пито круглого поперечного сечения соединенной с первичным измерительным преобразователем полного давления (ПИППД). Аналоговый сигнал ПИППД после оцифровки с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП) регистрируется персональной электронной вычислительной машиной (ПЭВМ) и сохраняется на магнитном носителе в виде текстового файла. Предусмотрено координатное устройство, обеспечивающее равномерное возвратно-поступательное перемещение напорной трубки в направлении нормальном оси струи, таким образом, чтобы организовать сбор данных при прямом и обратном проходе чувствительного элемента (ЧЭ) через поток газа. А также предусмотрен контроль давления газа в форкамере ГСА, непосредственно перед соплом. Течение газа является адиабатическим и изоэнтропическим, а перепад давлений в форкамере ГСА и среды, в которую происходит истечение – сверхкритическим.

Накопленный ПЭВМ массив показаний ПИППД пересчитывался в значения давления

согласно индивидуальной для каждого ПИППД градуировочной зависимости. Скорость воздушного потока определялась согласно уравнению сохранения энергии (Бернулли) для сжимаемого адиабатного потока

$$\frac{P_0}{P}=\left[1+\frac{(\chi-1)M^2}{2}\right]^{\chi/\chi-1}, \qquad (1)$$

где $P$, $P_0$ - полное и статическое давление соответственно; $\chi=C_p/C_v$ -показатель адиабаты; $C_p, C_v$ - изобарная и изохорная теплоемкость газа; $M=u/u_a$ - число Маха; $u_a$ - местная скорость звука в потоке, которое с учетом

$$u=M\sqrt{\chi RT} \qquad (2)$$

было представлено в виде

$$u=\sqrt{\frac{2RT\chi\left[\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\chi-1/\chi}-1\right]}{\chi-1}}, \qquad (3)$$

где $\mathrm{R}$ – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); $T$ – температура газа, К.

Объемный расход воздуха через сопло определялся согласно зависимости

$$G_{0v}=\frac{\mathrm{R}TG_0}{P_{\text{ос}}}, \qquad (4)$$

где $P_{\text{ос}}$ – давление окружающей среды, Па; $G_0$ – массовый расход воздуха через сопло, рассчитывался согласно зависимости

$$G_0=m\frac{P_0 q(\lambda)\mu F}{\sqrt{T_0}}, \qquad (5)$$

где $\mu F$ – эффективная площадь поперечного сечения сопла ГСА, м$^2$; $\mu$ – коэффициент расхода сопла ГСА; $q(\lambda)$ – газодинамическая функция;

$$m=\sqrt{\frac{\chi}{\mathrm{R}}\left(\frac{2}{\chi+1}\right)^{\frac{\chi+1}{\chi-1}}}.$$

Общий объемный расход воздуха в рассматриваемом сечении струи $G_\Sigma$ определялся в результате интегрирования рассчитанного согласно (3) профиля скорости газового потока по поверхности сечения струи

$$G_\Sigma=\int u\,dS. \qquad (6)$$

Таким образом, объемный расход через эжекционный контур, рассчитывался как

$$G_э=G_\Sigma-G_{0v}, \qquad (7)$$

а коэффициент эжекции как отношение расходов воздуха через эжекционный контур и через сопло ГСА

$$K_э=G_э/G_{0v}. \qquad (8)$$

На основе описанного алгоритма создана программа FVP, выполняющая постобработку накопленных данных измерений. Изображение рабочего окна программы FVP приведено на рисунке 1.

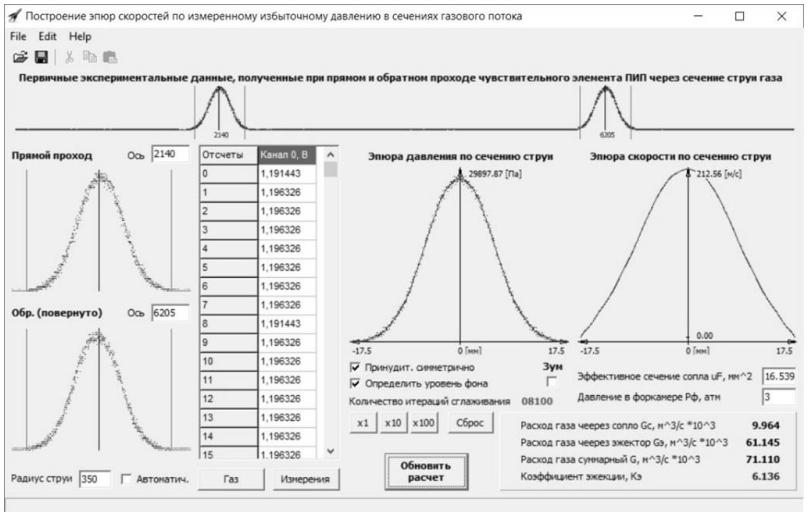


Рисунок 1 – Рабочее окно программы FVP для постобработки экспериментальных данных

Исходными данными для работы программы являются данные измерений зарегистрированные ПЭВМ и представленные в виде текстового файла в формате csv, которые после загрузки отображаются в табличном и графическом виде в рабочем окне программы. В диалоговом окне «Параметры измерений» (рисунок 2) вводятся коэффициенты полиномиальной градуировочной зависимости, связывающей измеренные значения с величиной давления, а также частота опроса каналов АЦП, *n* и скорость перемещения чувствительного элемента в поперечном сечении струи газового потока, *v*. В диалоговом окне «Свойства рабочего газа» (рисунок 3) вводятся необходимые для расчетов параметры используемого газа. Кроме того, необходимо ввести эффективную площадь сечения сопла и давление в форкамере ГСА при которых производились измерения.

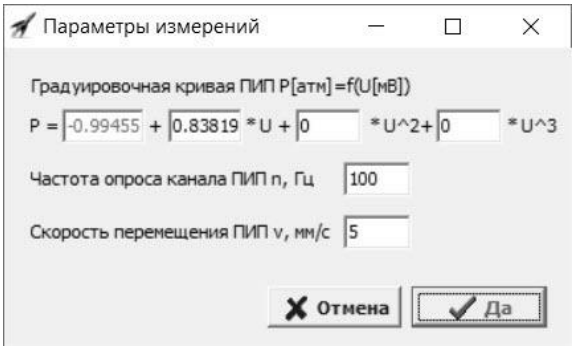


Рисунок 2 – Диалоговое окно «Параметры измерений»

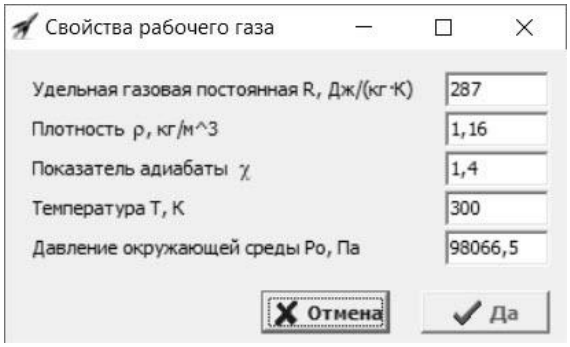


Рисунок 3 – Диалоговое окно «Свойства рабочего газа»

По загруженным данным программа в автоматическом режиме определяет положение оси газовой струи, а также ее радиус при прямом и обратном проходе ЧЭ ПИППД через поток. При этом считается, что он перемещался с постоянной скоростью вдоль прямой в поперечном сечении струи, проходящей через ее ось. Предусмотрена возможность ручной корректировки рассчитанных значений.

После выделения значимых диапазонов происходит совмещение данных измерений, полученных при прямом и обратном проходе, и их статистическая обработка, которая также включает в себя опцию нелинейного сглаживания массива данных по семи точкам. Реализована процедура их усреднения с помощью интерполяционного многочлена третьей степени, обеспечивающая получение уточнённого значения $y(i)$ по заданному значению $y(i)$ и ряду близлежащих значений (..., $y(i\text{-}1)$, $y(i)$, $y(i\text{+}1)$, ...), известных со случайной погрешностью. По результатам вычислений строится профиль давления в рассматриваемом сечении струи (рис. 4).

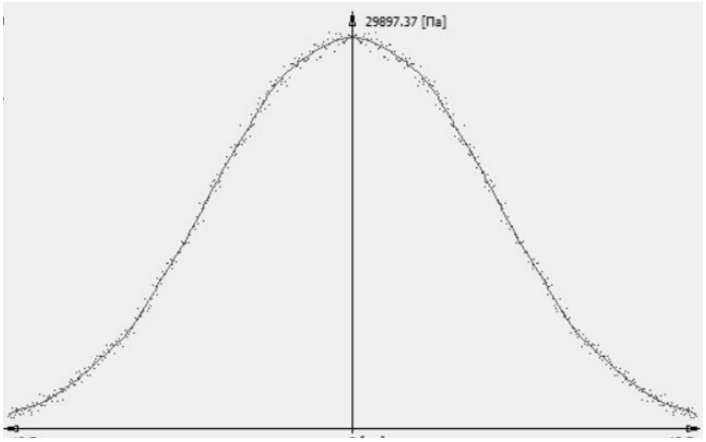


Рисунок 4 – Сглаженный профиль давления в сечении струи

Расчет профиля скорости, расходов газа и коэффициента эжекции производится согласно зависимостям (3-8), интегрирование скорости газового потока по поверхности сечения струи (6) осуществляется численно методом трапеций.

Созданная программа позволяет в автоматическом режиме определять положение и ширину пиков показаний ПИППД при прямом и обратном его проходе через поток. Производит пересчет данных согласно градуировочной зависимости, а также их статистическую обработку. Реализовано графическое представление профилей давления в потоке и скорости струи, а также возможность экспорта данных для их обработки в других специализированных пакетах в формате csv. Выполняет расчет объемных расходов газа ГСА через сопло и эжекционный контур, а также коэффициента эжекции.

Таким образом, разработанная программа позволяет значительно сократить трудоемкость обработки первичных экспериментальных данных при определении основных характеристик газового потока струйных устройств зондовым методом.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. Часть 1. Установки для научных исследований. – Новосибирск: Параллель, 2014. – 551 с.
2. Звегинцев В.И. Газодинамические установки кратковременного действия. В двух частях. Часть 2. Установки для промышленных приложений. – Новосибирск: Параллель, 2015. – 339 с.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. - 352 с.
4. Лысак И.А., Малиновская Т.Д., Лысак Г.В., Потекаев А.И., Кулагина В.В. Формирование волокнистых материалов методом пневматического распыления полимеров, находящихся в вязкотекучем состоянии. Известия вузов. Физика, т. 10. – 2016. – С. 56-63.
5. Brian J. Petrosky, Kevin T. Lowe, Philippe M. Bardet, Pacita I. Tiemsin, Christopher J. Wohl, Paul M. Danehy, and Matthieu Andre. Particle Image Velocimetry Applications Using Fluorescent Dye-doped Particles, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, 2015, pp. 2015-1223.
6. Barreras F., Lozano A., Barroso J., Lincheta E. Experimental characterization of industrial twin-fluid atomizers // Atomization and sprays. 2006. Vol. 16. pp.127-145.
7. Baltrenas, P., Platova, D. Experimental analysis of the six-channel cyclone with spiral shell. Environmental Technology (United Kingdom), 37 (6), 2016, pp. 652-661.

**Лысак Илья Александрович – к.т.н., с.н.с. СФТИ ТГУ, доцент ИК ТПУ тел.: (3822) 705-087, e-mail: lysakilya@gmail.com; Звегинцев Валерий Иванович – д.т.н., г.н.с. ИТПМ СО РАН; Лысак Галина Владиленовна – к.х.н., с.н.с. СФТИ.**