

В результате перемножения измеренных значений скорости (м/с) и высоты материала (м) на известную ширину аэрожелоба (м) получается текущее значение объемного расхода сыпучего материала (м³/с). В приборе имеются два аналоговых выхода 4...20 мА для выдачи измерительных сигналов, пропорциональных объемному расходу и скорости материала в аэрожелобе.

Произведение рассчитанного объемного расхода (м³/с) на известную плотность материала (кг/м³) позволяет получить текущий массовый расход сыпучего материала (кг/с).

Прибор SlideControl легко монтируется на верхней поверхности аэрожелоба (рис. 3) с помощью специального монтажного узла и фиксируется хомутом, что позволяет легко проводить обслуживание, технологические осмотры и ремонт прибора.

В зависимости от геометрических размеров аэрожелоба используются измерительные пластины трех размеров 150, 200 и 250 мм, длина которых регулируется при монтаже в пределах ± 25 мм. Данные пластины являются сменными и легко заменяемыми.

Прибор позволяет проводить измерения мгновенного расхода сыпучего материала в аэрожелобе с погрешностью ± 5 %.

В случае, когда необходимо измерить расход с максимально возможной точностью, вводимая в прибор плотность сыпучего материала уточняется с учетом возникающей при транспортировке текучести материала и при

дальнейших измерениях операции производятся уже с текущей плотностью материала. Для этого измеряется высота слоя материала на текстильной перегородке при подаче воздуха в аэрожелоб и при прекращении подачи воздуха. На основании этих измерений определяется текущая плотность материала, которая вводится в прибор:

$$\delta_{\text{тек}} = \delta \cdot h_{\text{норм}} / h_{\text{тек}},$$

где δ — известная плотность материала; $h_{\text{норм}}$ — высота материала на текстильной перегородке без подачи воздуха; $h_{\text{тек}}$ — высота материала на текстильной перегородке при подаче воздуха.

Плотность используемого материала, как правило, известна заранее или легко определяется лабораторным путем.

Кроме того, в приборе SlideControl предусмотрена процедура калибровки с помощью встроенной функции тоталайзера, который показывает расход сыпучего материала за определенный интервал времени. При калибровке сравниваются показания тоталайзера за заданный интервал времени и вес материала, собранного на выходе аэрожелоба за это же время, изме-

ренный весами. На основании этих двух замеров рассчитывается поправочный калибровочный коэффициент.

Первый опыт применения расходомеров SlideControl (рис. 4) показал высокую эффективность новой технологии измерения расхода сыпучих материалов в аэрожелобах и широкие перспективы ее дальнейшего внедрения в различных отраслях промышленности.

Степанов Александр Владиславович — руководитель направления ООО "МетраТек".

Контактный телефон (495) 638-54-07.

ЦИФРОВОЙ ДАТЧИК РАСХОДА ГАЗА

Д.В. Зиновьев (МИЭТ)

Проанализированы причины, тормозящие внедрение микроэлектронных датчиков в области термоанемометрического измерения массового расхода газа. Обнаружены и приводятся принципиальные особенности баллистического (свободно молекулярного) режима теплопроводности, который до сих пор считался возможным только в разреженных газах. Разработана математическая модель датчика расхода газа с применением программ, реализующих метод конечных элементов. Представлен цифровой измеритель расхода газа, реализованный с учетом особенностей тепло- и массопереноса в микросистемах.

Ключевые слова: датчик расхода газа, термоанемометр, тепловые микросистемы.

Использование микроэлектронных (МЭМС) датчиков в АСУТП — главная линия развития современных средств автоматизации. Внедрению интеллектуальных датчиков во многом способствует низкая стоимость (благодаря применению высоких технологий при их производстве). Вместе с тем ситуация на рын-

ке датчиков расхода газа, теплопроводности и подобных, использующих в своем составе прецизионные системы контроля температуры подогрева измеряемого газа, остается на уровне 20...30-летней давности. Наибольшее распространение в термоанемометрии приобрели трехэлементные модули, состоящие из на-

гревателя и двух термометров сопротивления, основанные на измерении разницы температуры газа до и после нагревания [1]. Достоинством такого модуля является физический принцип действия и использование в качестве активных элементов традиционных проволочных, а в новейших конструкциях – тонкопленочных терморезисторов. Общим их недостатком является низкое сопротивление терморезисторов, а вследствие этого перегрев измерительным током, что снижает точность прибора.

Стремление минимизировать размеры модуля, его тепловую инерционность и расход энергии требует размещения модуля внутри измеряемого потока, и поэтому необходимо учитывать газодинамические особенности, влияющие на теплопередачу. В частности, тонкопленочная конструкция несовершенна в газодинамическом отношении, так как представляет собой площадку. Условия ее обтекания и теплоотдача за счет вынужденной конвекции зависят от многих факторов: геометрии канала, расположения относительно ядра потока, угла атаки, наличия турбулентности и др. Измеряется не температура газа, а температура корпуса датчика, что не вносит ошибки только в стационарном режиме. На стабильность измерения отрицательно влияет процесс рекристаллизации материала терморезисторов – тонкопленочной платины, а также взаимодействие его с компонентами измеряемого газа. Вследствие этих недостатков, а также сложности технологии (особенно при использовании вместо относительно массивной подложки многослойной мембраны из нитрида и оксида кремния) коммерческий успех этого варианта конструкции остается неясным.

Автор связывает ближайшие перспективы термоанемометрии с полупроводниковым терморезистором-микронагревателем нового поколения, разработанным на основе микроэлектронной технологии ООО "Тепловые микросистемы" (г. Зеленоград, www.tmems.ru).

С помощью экспериментов удалось обнаружить необычно высокую интенсивность теплоотдачи нагретых микрообъектами: мощность, отнесенная к площади, оказалась на порядок больше, чем следует из уравнений Фурье-Лапласа для сферических тел микроразмеров, нагретых до той же температуры. Уравнение Ньютона-Рихмана: $Q = \alpha \cdot S (T_n - T_{окр})$, связывающее мощность (Q), температуру среды и микронагревателя ($T_{окр}$ и T_n), а также его площадь (S), содержит неопределяемый напрямую коэффициент теплоотдачи α . Поскольку для малых тел он связан с теплопроводностью среды λ равенством

$$\alpha = \frac{2 \cdot \lambda}{d},$$

где d – толщина теплового пограничного слоя, приходится констатировать возможность локального повышения теплопроводности газа вблизи нагретого точечного источника [2]. Это предположение не затрагивает, естественно, термодинамических парамет-

ров: наряду с коэффициентом диффузии и вязкостью теплопроводность отражает лишь механизм переноса энергии и импульса в среде. Чтобы прояснить причину нового размерного эффекта, было выполнено измерение теплового поля, создаваемого микронагревателем. Использовался подвижный точечный терморезистор – термометр сопротивления. Результат (рис. 1) свидетельствует о высоком температурном градиенте в окрестностях микронагревателя, среднее значение которого на расстоянии 100 мкм от него составляет около 20000 К/см, а учитывая гиперболическую зависимость $T(R)$ при $R = 10$ мкм, он достигает 50000 К/см, то есть 2...3 К на одну длину свободного пробега. Отметим, что создать столь высокий градиент в указанном диапазоне температур невозможно иными известными техническими средствами.

Приближенное решение интегродифференциального уравнения Больцмана позволило установить, что в столь мощном силовом поле молекулы газа приобретают направленное движение, которое типично для разреженных газов в режиме, называемом свободно молекулярным, или более образно – баллистическим [3]. В переносе энергии по этому механизму при нормальном давлении участвует в 106 раз больше молекул, чем при разрежении, что и служит причиной повышения теплопроводности (но далеко не в той же мере, так как упорядоченность имеет лишь частичный характер). Новый режим имеет важнейшее практическое значение в термоанемометрии в силу нескольких его особенностей.

1. Микронагреватель обладает высоким, нетипичным для тепловых приборов быстродействием, что объясняется высоким значением коэффициента теплоотдачи, так как время остывания

$$\tau = \frac{C_v \cdot V}{\alpha \cdot S},$$

где C_v – теплоемкость материала микронагревателя; V – объем микронагревателя; S – площадь поверхности микронагревателя; α – коэффициент теплоотдачи.

2. Точечный микронагреватель обладает конвективной устойчивостью, то есть его теплоотдача зависит от движения газа меньше, чем в любой традици-

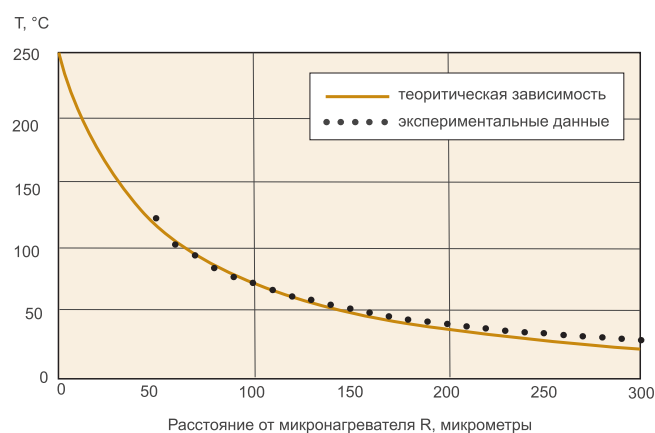


Рис. 1. Тепловое поле микронагревателя

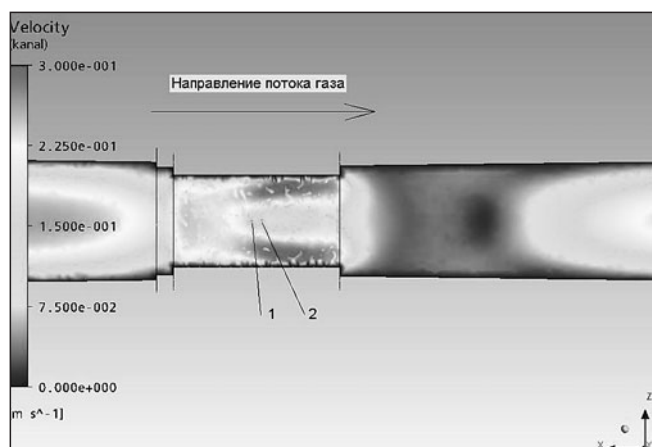


Рис. 2. Результат моделирование газового потока в канале датчика расхода, где 1 – измерительный терморезистор-микронагреватель, 2 – опорный терморезистор-микронагреватель

онной конструкции. Но это не уменьшает чувствительность к вынужденной конвекции по абсолютно значению, так как величина теплоотдачи в газ увеличивается почти на порядок.

3. Микронагреватель полностью защищен от оседания аэрозольных частиц в силу эффекта термофореза, которая при условии высокого градиента температуры проявляется при нормальном и повышенном давлении.

Эти достоинства реализуются в датчике расхода газа, причем благодаря функциональной насыщенности оказывается достаточно двух точечных терморезисторов-микронагревателей, выполненных на одном кристалле. Выходным сигналом служит разность мощностей, потребляемых для поддержания постоянной температуры измерительным (первым по ходу потока) и опорным нагревателями. Благодаря противоположному воздействию увеличения скорости потока на мощность опорного микронагревателя и величине подогрева газа, идущего от измерительного микронагревателя к опорному, существует возможность стабилизировать его мощность за счет выбора диаметра газового канала и расстояния от него до измерительного микронагревателя. Такой способ вычисления расхода позволяет существенно уменьшить зависимость по-



Рис. 3. Цифровой датчик расхода газа

казаний от изменений температуры измеряемого газа. Расчет положения микронагревателей в потоке и относительно друг друга производился программой, реализующей метод конечных элементов. Результаты моделирования скорости потока в газовом канале представлены на рис. 2.

При разработке модели учитывались помимо тепловых и газодинамические особенности тепловых микросистем. Согласно аналогии явлений переноса в газах, локальное увеличение теплопроводности вблизи нагретого микрообъекта указывает на увеличение и других коэффициентов переноса: вязкости и коэффициента диффузии. Увеличение вязкости было обнаружено путем измерения дополнительного гидравлического местного сопротивления, возникающего при включении микронагревателя. Холодный воздух проходит через нагретую зону, образуемую микронагревателем, минуя ее вязкую высокоградиентную часть, диаметр которой согласно рис. 1 составляет 200...300 мкм.

С применением разработанного датчика был изготовлен цифровой прибор измерения массового расхода газа и начато его промышленное производство (рис. 3). Цифровой измеритель расхода газа имеет следующие метрологические характеристики:

- погрешность измерения расхода газа составляет $\pm 2\%$ от полной шкалы;

- диапазон измеряемых расходов газа: минимальный 0...100 мл/мин, максимальный 0...3л/мин.

НИР и ОКР по данной тематике поддерживается фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Список литературы

1. *Кремлевский П.П.* Расходомеры и счетчики количества веществ. // Справочник 4-е изд. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение. 2002.
2. *D.V. Zinoviev, V.M. Andreev, K.A. Tuzovsky, D.V. Loktev.* Investigation of microobjects heat transfer. Second International Conference on Transport Phenomena in Micro and Nanodevices. Il Ciocco Hotel and Conference Center, Barga, Italy. June. 2006
3. *Крюков А.П., Левашов В.Ю., Шишкова И.Н., Ястребов А.К.* Кинетическое уравнение Больцмана и подходы к его решению для инженерной практики // Учеб. пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2005.

Зиновьев Дмитрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент каф. МПТЭ Московского института электронной техники. E-mail: info@tmems.ru Контактный телефон 8-903-129-44-41.

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка на журнал "Автоматизация в промышленности" на первое полугодие 2009 г. Оформить подписку Вы можете:

В России – индекс в каталоге "Роспечать" **81874** и "Пресса России" **39206**

В Казахстане – индекс в каталоге "Пресса России" **39206**

Все желающие, вне зависимости от места расположения, могут оформить подписку, прислав заявку в редакцию или заполнив анкету на сайте **www.avtprom.ru**