

Д. т. н. В. Н. ГОДОВАНЮК, к. т. н. В. В. РЮХТИН,  
Ю. С. МИХАЙЛИЧЕНКО, А. Г. ШВЕЦ,  
А. Б. ШИМАНОВСКИЙ, И. И. ФЕДИНЧУК

Украина, г. Черновцы, ЦКБ «Ритм»,  
Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича  
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net, microel@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
12.05 2010 г. — 19.05 2011 г.

Оппонент к. т. н. В. А. БОЛТЕНКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ДАТЧИК СКОРОСТИ ГАЗОВОГО ПОТОКА

*В предложенной конструкции датчика используется связь между скоростью потоков газа и тепла внутри самого датчика. Разработана планарная технология изготовления датчика и методика измерений в диапазоне температур.*

Для того чтобы экономить, надо уметь считать. Например, в современных сеялках стоят датчики штучного счета твердых частиц (семян), позволяющие производить посев семян с погрешностью, составляющей единицы процентов от их количества, предусмотренной технологией данной операции. Это достигается применением оптопар в датчиках. В то же время, при очень малых размерах семян оптические методы контроля малоэффективны. Поэтому расход мелких семян можно регулировать, контролируя скорость воздушного потока, который их переносит в конструктивных элементах сеялки. Отсюда и требования, предъявляемые к датчику счета. Он должен быть дешевым, надежным, стойким к воздействию тепловых и механических факторов и химических веществ, применяемых при посеве, не должен вносить изменений в ламинарный поток воздуха и при этом обеспечивать высокую точность измерений. Описанию результатов разработки такого датчика посвящена настоящая работа.

Существует великое множество конструктивных решений измерителей скорости и объема газовых и жидкостных потоков. Например, фирма Sitrans P [1] использует для создания датчика скорости дроссельную заслонку. Скорость потока определяют по разности давлений с обеих ее сторон. Авторы [2] предлагают термоанемометрический датчик, использующий зигзагообразную платиновую нить, которая перекрывает сечение трубопровода. Такое техническое решение позволяет измерять расход газа с погрешностью до  $\pm 2,5\%$ . Основы для разработки анемометрических датчиков были заложены еще в начале XX века и сформулированы в [3].

Анализ принципов работы известных датчиков скорости газового потока позволил прийти к выводу, что в силу конструктивных особенностей они, в основном, сами вносят изменения в поток воздуха, который переносит семена. Для уменьшения погрешностей измерения большинству датчиков требуется до-

полнительный учет влияния внешней температуры и сложный алгоритм обработки сигнала [4]. Это делает проблематичным их применение непосредственно в поле при проведении сельскохозяйственных работ.

В настоящей работе для разработки структуры датчика скорости газового потока была использована зависимость между скоростью потока газа и тепловым потоком внутри самого датчика. В основу конструкции датчика положен принцип контроля расхода энергии на поддержание теплового равновесия между двумя терморезисторами (ТР), находящимися в потоке газа при разных температурах. Несомненно, расход энергии будет зависеть от скорости потока газа. Такой метод позволяет абстрагироваться от влияния температуры внешней среды.

Разработанный датчик функционирует по принципу терморезисторного анемометра. К достоинствам термоанемометров относятся большой диапазон измеряемых скоростей и быстродействие, которое позволяет контролировать скорости, изменяющиеся с частотой до 10 Гц, а также способность работать в условиях агрессивных сред и повышенной температуры (до 500°C).

Разработанный датчик скорости газового потока, общий вид которого приведен на **рис. 1**, состоит из ножки 1 и крышки 2. На ножке смонтированы две кремниевые подложки 3, на которых сформированы ТР 4 и нагреватели 5. После электромонтажа ТР и нагревателей ножка датчика закрывалась крышкой, которая закреплялась эпоксидно-полиамидным компаундом.

В датчике применен косвенный нагрев терморезистора, благодаря чему между терморезисторами, расположенными вдоль направления потока газа, поддерживается постоянная разность температур ( $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ).

Для обеспечения наилучшего теплового контакта терморезисторы формировались непосредственно на одной подложке с нагревателями, которые обеспечивают указанную выше постоянную разность температуры. Сила тока нагревателя, поддерживающего постоянное значение  $\Delta T$ , является функцией скорости газового потока и описывается законом Кинга [5, с. 328].

В качестве подложек для изготовления ТР и нагревателей использовали предварительно окисленные кремниевые пластины, что обеспечило хорошую

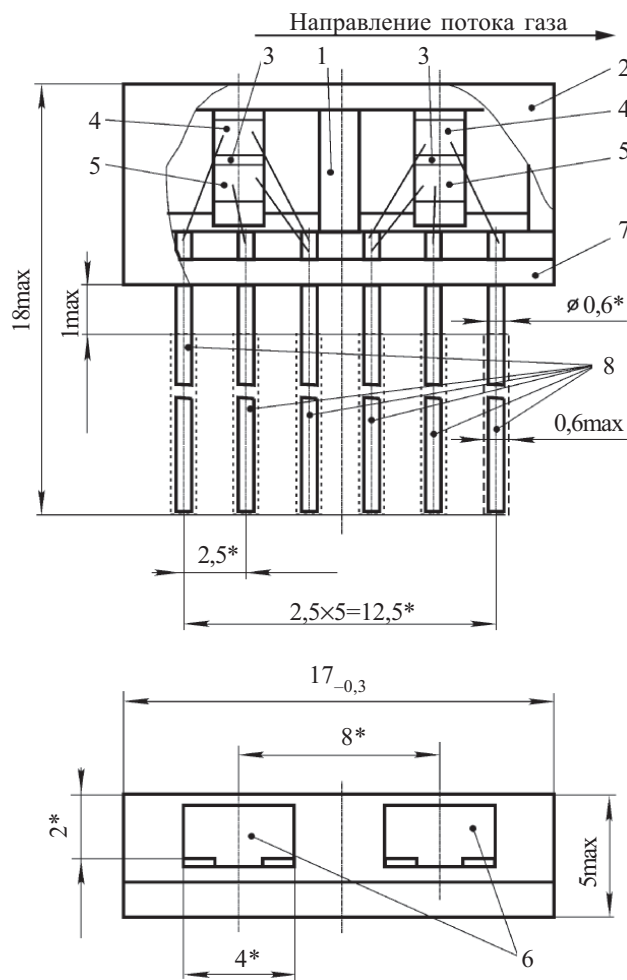


Рис. 1. Датчик скорости газового потока:

1 — ножка; 2 — крышка; 3 — подложка; 4 — терморезистор; 5 — нагреватель; 6 — тепловод; 7 — цоколь; 8 — выводы

теплопроводность (тепловой контакт) и позволило создать электрическую изоляцию между ТР и подложкой. Для придания необходимой геометрии терморезисторам и нагревателям пользовались стандартными приемами фотолитографии. В качестве материала для ТР используют, в основном, платину, преимущества которой очевидны и бесспорны. Однако для выполнения конкретной задачи по разработке дешевого надежного датчика скорости воздушного потока авторы посчитали нецелесообразным применение платины.

Использование полупроводниковых ТР оказалось неприемлемым из-за резкого изменения их свойств в широком диапазоне температуры. Также из-за того, что сопротивление полупроводниковых ТР меняется вдвое при изменении температуры на каждые 10°C, может нарушаться симметрия конструкции датчика (симметричность двух пар «транзистор—нагреватель» обеспечивает независимость измерений от температуры окружающей среды). Поэтому в качестве материала для ТР был выбран никель, а для нагревателя — хром, т. е. широко применяемые в производстве изделий микроэлектроники материалы.

Термическое напыление никеля проводили на подслое хрома для улучшения адгезии никеля к оксиду

кремния подложки. При заданных геометрических размерах и толщине слоя никеля получены ТР с сопротивлением от 1,9 до 2,9 кОм с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) порядка 0,3%/°C.

Стандартный метод напыления никелевых ТР с вольфрамовых испарителей позволил получить ТКС в интервале 0,19—0,28%/°C. По данным [6, с. 232], ТКС никеля составляет 0,6%/°C. Основная причина снижения значений ТКС, очевидно, заключается в том, что в процессе термического напыления никеля вольфрам частично растворяется в нем, т. е. формирование ТР происходит с примесью вольфрама. Это приводит не только к снижению ТКС, но и к значительному разбросу значений сопротивления слоя по площади пластины. Кроме того, свойства объемного материала отличаются от свойств пленок, в том числе для «островковой» структуры пленки, причем для тонких пленок эти различия весьма существенны. На полученные результаты также влияло наличие подслоя хрома.

Для устранения указанных недостатков был проведен ряд экспериментов:

- напыление слоев осуществили с вольфрамовых испарителей на установке А-700Q с безмасляной откачкой и с планетарной системой закрепления пластин, что позволило проводить процесс последовательно из двух источников без выгрузки подложек и получить более равномерные слои;

- для исключения подпыления вольфрама провели процесс напыления из графитового нагревателя;
- пленки ТР нанесли методом катодного распыления никеля;

- полученные пленки подвергли термическому отжигу в среде инертного газа, водорода и в вакууме при температуре до 700°C.

Выполненные усовершенствования технологических операций позволили уменьшить разброс значений удельного электрического сопротивления по пластине с 18 до 7% и получить пленки с ТКС=0,28—0,30%/°C.

Нагреватели создавались путем напыления хрома. Их формировали методом фотолитографии. Отжиг сформированных хромовых нагревателей проводили при температуре 500°C в атмосфере азота на протяжении 30 мин. Затем напыляли никель для получения контактов к нагревателям. Последующие исследования показали, что для получения более надежных контактов можно напылять также алюминий. ТКС нагревателя с никелевыми контактами составляет 0,01%/°C, а с алюминиевыми — около 0,02%/°C.

Следует отметить, что размеры нагревателя и контакты к нему следует подбирать так, чтобы ТКС приближался к нулю.

Изготовление нагревателя проводилось различными способами. При термическом распылении хрома заданное удельное электрическое сопротивление достигалось при толщине пленки хрома в несколько десятых долей микрометра. При этом в месте перехода на токопроводящую дорожку образовывается ступенька металла, которая в процессе эксплуатации может привести к обрыву контакта. Кроме того, значение ТКС такой пленки хрома уже во втором знаке

после запятой отлично от нуля ( $0,02\%/^{\circ}\text{C}$ ), что негативно сказывается на точности измерений в интервале рабочей температуры (от  $-10$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ ). Эти недостатки отсутствуют в титановых нагревателях, изготовленных методом катодного распыления на установке с безмаслянной откачкой Z-550: при среднем номинале сопротивления  $R=11,5$  кОм было получено значение ТКС, равное  $-0,0046\%/^{\circ}\text{C}$ , а при  $R=6,3$  кОм — равное  $-0,012\%/^{\circ}\text{C}$ , т. е. очевидно, что при сопротивлении порядка 8 кОм можно получить почти нулевое значение ТКС.

Также были сконструированы теплопроводы 6 (см. рис. 1) и цоколь 7 датчика (несущий узел ножи). Цоколь представляет собой цельнолитую деталь в форме параллелепипеда, изготовленную из эпоксидной пресс-композиции УП-3111, армированную медной проволокой марки М1 диаметром 0,6 мм. В верхней части цоколя сформированы окна под теплопроводы. Теплопроводы имеют вид Г-образных элементов, изготовленных из медной ленты. Их поверхность защищена от коррозии и механических повреждений гальваническим покрытием. Соединение теплопроводов с цоколем осуществлено эпоксидно-полиамидным компаундом. На теплопроводах были смонтированы подложки с ТР и нагревателями, которые затем коммутировались между собой и блоком выводов. Сам блок выводов сформирован в нижней части цоколя.

С наружной стороны датчика предусмотрена длина выводов 9 мм для возможности осуществления внешней коммутации. С внутренней стороны механической зачисткой выводов созданы участки для коммутации ТР и нагревателей. Для защиты от коррозии и проведения ультразвуковой сварки площадки и выступающие части выводов были покрыты никелем методом химического осаждения. Наружные части выводов были облужены.

В датчике конструктивно соблюдена симметрия, которая может несущественно нарушаться только из-за технологических погрешностей при изготовлении ТР и нагревателей.

Электрическая схема датчика показана на **рис. 2**.

Измерения параметров датчиков в диапазоне температуры внешней среды от  $-10$  до  $60^{\circ}\text{C}$  проводили на установке, блок-схема которой приведена на **рис. 3**.

Температуру внешней среды обеспечивала камера тепла и холода 1 марки АДБ7.0002.00.00 с точностью поддержания температуры  $2^{\circ}\text{C}$ . В трубу 2 диа-

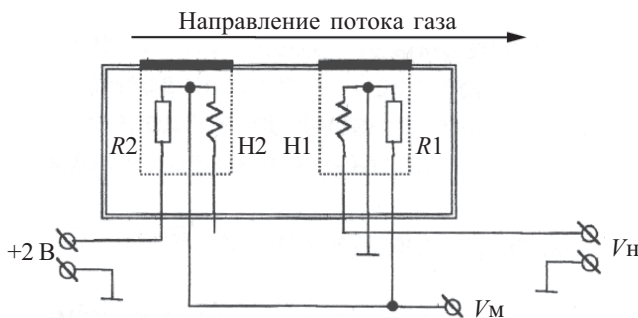


Рис. 2. Электрическая схема датчика:  
R1, R2 — терморезисторы; H1, H2 — нагреватели

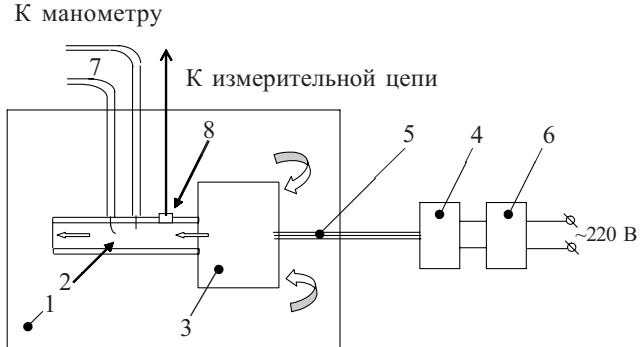


Рис. 3. Блок-схема установки для измерения параметров датчика:

1 — камера тепла и холода; 2 — труба диаметром 32 мм; 3 — центробежный компрессор; 4 — коллекторный двигатель; 5 — привод компрессора; 6 — автотрансформатор; 7 — капилляры; 8 — датчик

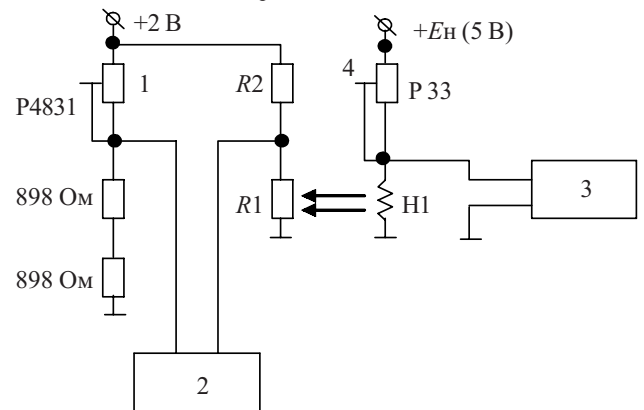


Рис. 4. Электрическая схема установки для измерений параметров датчика:

1 — магазин сопротивлений P4831 ( $\Delta R=0,001$  Ом); 2 — вольтметр В7-21А; 3 — вольтметр В7-16А; 4 — магазин сопротивлений P33 ( $\Delta R=0,1$  Ом)

метром порядка 32 мм нагнетался воздух центробежным двухступенчатым компрессором 3. Скорость его оборотов задавалась коллекторным высокоскоростным двигателем 4, вынесенным за пределы камеры тепла и холода, через привод компрессора 5. Регулировка скорости вращения двигателя обеспечивалась автотрансформатором 6. Такая компоновка позволила стабилизировать температуру внутри камеры, т. к. был исключен нагрев воздуха двигателем компрессора. Манометром через капилляры (трубки Пито) 7 измерялось давление (его значение в соответствии с законом Бернулли пропорционально квадрату скорости воздушного потока). В установке использовали дифференциальный манометр МНН-240-(5)-1,0. Относительная погрешность измерения давления не превышала 1%. Датчик 8 вмонтирован в стенку трубы таким образом, чтобы он не вносил изменения в ламинарный поток воздуха, а в контакт с воздушным потоком вступали его теплопроводы.

Измерения параметров датчика проводили по схеме, приведенной на **рис. 4**. Алгоритм измерений был следующим.

Магазином сопротивлений 1 выставляли напряжение, равное нулю, с точностью до 10 мкВ. Оно контролировалось вольтметром 2.

На нагреватель датчика Н1 подавали такое напряжение, чтобы перегрев терморезистора R1 относительно R2 (т. е.  $\Delta T$ ) составлял 10°C. Выходной сигнал с вольтметра 3 является функцией скорости воздушного потока.

Для каждого датчика при  $\Delta T=10^\circ\text{C}$  определяли напряжение разбаланса моста

$$\Delta U = U_h - U_0 \quad (1)$$

Значения напряжения без перегрева  $U_0$  и с перегревом  $U_h$  определяли по формулам

$$U_0 = U_n \frac{R1}{R1 + R2}; \quad (2)$$

$$U_h = U_n \frac{R1 + \alpha TR1}{R1 + \alpha \Delta TR1 + R2}, \quad (3)$$

где  $U_n$  — напряжение питания ( $U_n=5\text{ В}$ );

$\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления (для ТР в диапазоне 0—100°C  $\alpha=\text{const}$ ).

Меняя напряжение  $U_n$  на нагревателе Н1 с помощью магазина сопротивлений 4, добивались, чтобы значения сигнала разбаланса  $\Delta U$  были равны расчетному для каждого измеряемого датчика. Регистрация выходного сигнала на вольтметре В7-16 позволяла контролировать изменение скорости потока.

Зависимость напряжения  $U_n$  на нагревателе от динамического давления в исследуемой магистрали, которое, как указывалось ранее, пропорционально квадрату скорости воздушного потока, показана на рис. 5. Измерения проводили для трех образцов датчика при двух значениях температуры окружающей среды.

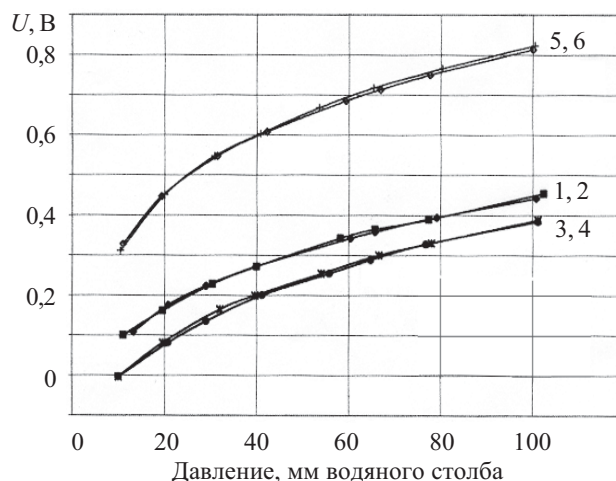


Рис. 5. Зависимость напряжения на нагревателе от динамического давления в трубе для трех образцов датчика, находящихся при 32°C (1, 3, 5) и при 60°C (2, 4, 6)

Принципиальная электрическая схема включения датчика скорости газового потока, представленная на рис. 6, позволила получить электрический сигнал, пропорциональный скорости этого потока [3]. Схема состоит из усилителя сигнала разбаланса на операционном усилителе DA1; измерительного моста R1, R2, R5, R6, R7, R14; усилителя тока VT1, VT2; нагревателя R4. На вход подается предварительное смещение моста, которое при балансе моста обеспечивает напряжение 0 В между инвертирующим и неинвертирующим входами DA1 и постоянный перегрев

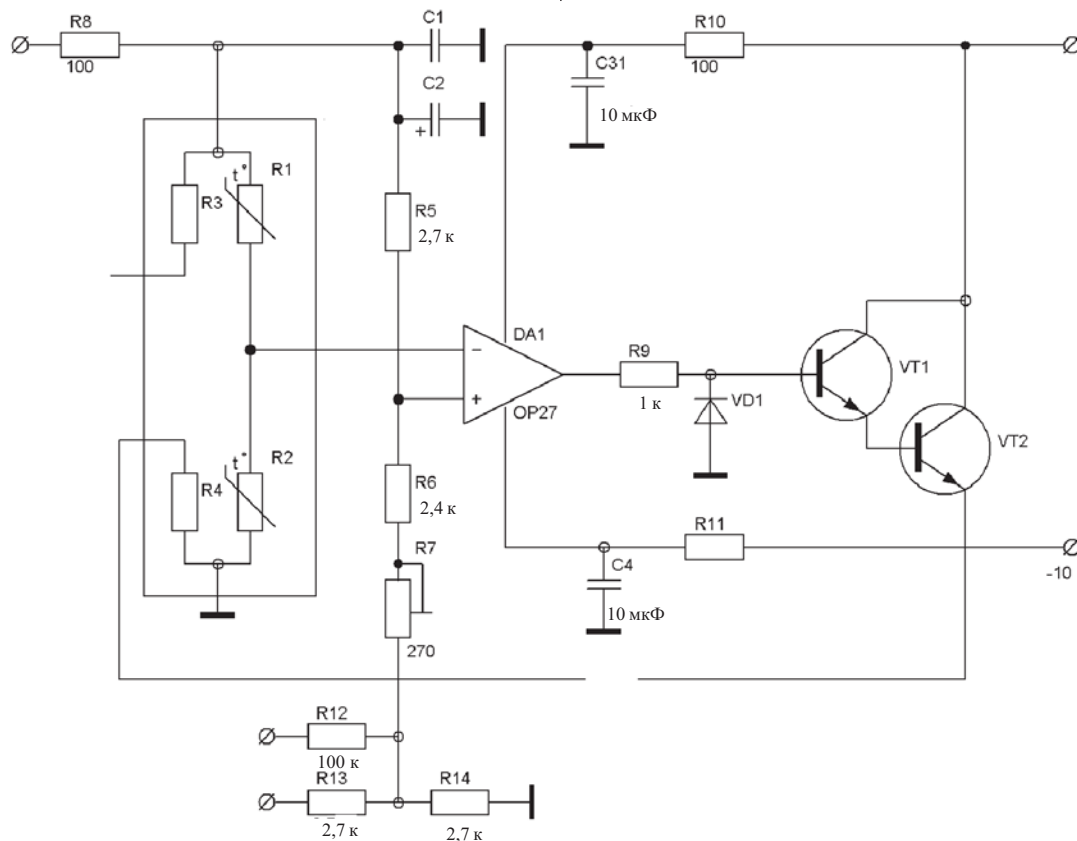


Рис. 6. Принципиальная электрическая схема включения датчика скорости газового потока



терморезистора  $R2$  относительно  $R1$  на  $10^\circ\text{C}$ . При наличии потока газа температура терморезистора  $R2$  снижается, что ведет к появлению напряжения разбаланса моста, которое с выхода  $DA1$  через усилители тока  $VT1$ ,  $VT2$  приходит на нагреватель  $R4$ . Последний повышает температуру, чем возобновляет баланс моста. Тепловая связь между  $R2$  и  $R4$  является отрицательной обратной связью для усилителя  $DA1$ . В результате, при увеличении скорости газового потока постоянно и пропорционально ему растет напряжение на нагревателе  $R4$ , которое и является выходным сигналом схемы, определяющим скорость газа.

\* \* \*

В результате конструкторско-технологических и схемотехнических решений были разработаны и изготовлены надежные, недорогие измерители скорости газовых потоков, которые можно производить серийно. Разработанный датчик по соотношению «цена/качество» превосходит серийно производимые датчики-аналоги, что обеспечивается простотой конструкции и применением никеля и титана вместо дорогостоящих драгоценных металлов.

Предложенное конструктивное решение (симметричность двух пар «терморезистор—нагреватель») устраняет зависимость результатов измерений от тем-

пературы окружающей среды. Оригинальные технологии позволяют получать такие элементы датчика, как нагреватели, с ТКС, близким к нулю, а терморезисторы — с необходимой повторяемостью параметров и характеристик.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мельниченко А. Измерители скорости и давления потока Sitrans P // Электронные компоненты и системы.— 2000.— № 7.— С. 5. [Mel'nichenko A. // Elektronnyye komponenty i sistemy.— 2000. N 7. S. 5]
2. Морозов-Ростовский Г. П. Термоанемометрические плочные преобразователи // Измерительная техника.— 1968.— № 5.— С. 99. [Morozov-Rostovskii G. P. // Izmeritel'naya tekhnika. 1968. N 5. P. 99]
3. King L.V. On the convection of heat from small cylinders in a stream fluid determination of the convection constants of small platinum wires with applications to the hot-wire anemometry // Phil. Trans. Roy. Soc. London, A. 214.— 1914.— P. 393 — 432.
4. Посудін Ю. І. Методи вимірювання параметрів навколишнього середовища.— Київ: Світ, 2003. [Posudin Yu. I. Kiyiv. Svit. 2003]
5. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств.— М.: Додэка, 2007. [Volovich G. I. Moscow. Dodeka. 2007]
6. Физические величины. Справочник // Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова.— М.: Энергоатомиздат, 1991. [Pod red. I. S. Grigor'eva, E. Z. Meilikhova. Moscow. Energoatomizdat. 1991]

#### НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Суминов И. В., Белкин П. Н., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Крит Б. Л., Борисов А. М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2-х томах. Т. 1.— Москва: Техносфера, 2010.— 464 с.

В книге рассмотрены явления катодного и анодного нагрева токопроводящих материалов в водных растворах электролитов; процессы локального вскипания электролитов в окрестности электрода с малой поверхностью, формирование сплошной и устойчивой парогазовой оболочки, электрическая проводимость в парогазовой среде, теплофизические и электрохимические аспекты анодного варианта нагрева. Дан критический обзор результатов применения анодного нагрева с целью закалки, нитрозакалки среднеуглеродистых или инструментальных сталей, цементации и нитроцементации конструкционных сталей или железуглеродистых сплавов. Описаны фазовый состав, структура и эксплуатационные свойства упрочненных материалов. Изложены способы и устройства для нагрева металлов и сплавов в электролите, режимы обработки, составы электролитов и результаты их практического использования.

Для научных работников, инженеров, а также преподавателей, аспирантов и студентов физических, химических и технических специальностей.

