

Р.К.АЗИМОВ

О.С.РАЙИМЖОНОВА

С.А.МАҚСУДОВ

**Микропроцессорные многофункциональные тепловые преобразователи для
контроля параметров потоков жидкостей и газов**

Ташкент 2016

Аннотация

Микропроцессорные многофункциональные тепловые преобразователи для контроля параметров потоков жидкостей и газов. Азимов Р.К., Райимжонова О.С., Максудов С.А. ТашГТУ, 2016, 130 с.

В данной работе рассмотрены вопросы состояния и развития преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов, математические модели тепловых преобразователей термоанемометрического типа и их основные характеристики, методики структурного и параметрического проектирования тепловых преобразователей термоанемометрического типа, приведены примеры практического применения тепловых преобразователей термоанемометрического типа для систем контроля параметров потоков жидкостей и газов.

Книга предназначена для специалистов занимающихся разработкой и эксплуатацией преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов, а также для студентов и магистров соответствующих специальностей при изучении специальных дисциплин, подготовке выпускных работ и магистерских диссертаций.

Печатается по решению научного совета ТашГТУ протокол №12 от 08.07.2016.

Рецензенты:

Д.т.н., проф.

Д.т.н., проф.

Шипулин Ю.Г.(ТашГТУ)

Арипов Н.М. (ТИИЖТ)

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕПЛОВЫХ МЕТОДОВ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ	
1.1 Общие вопросы контроля параметров потоков жидкостей и газов.....	6
1.2 Анализ принципов построения тепловых преобразователей скорости и расхода	8
1.3 Принцип построения тепловых преобразователей скорости газов жидкостей термоанемометрического	15
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА.	
2.1 Общие вопросы математических моделей тепловых преобразователей термоанемометрического типа.....	26
2.2 Математическая модель однородного цилиндрического теплопровода без дополнительного	30
2.3 Математическая модель неоднородного протяженного цилиндрического теплопровода без	33
2.4 Математическая модель неоднородного цилиндрического теплопровода с дополнительным источником тепла.....	35
2.5 Математическая модель сложного неоднородного цилиндрического теплопровода с дополнительным источником тепла.....	37
ГЛАВА 3. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА.	
3.1 Общие вопросы основных характеристик тепловых преобразователей термоанемометрического типа (ТПТТ).....	42
3.2 Статические характеристики ТПТТ	45
3.3 Динамические характеристики ТПТТ	48
3.4 Надежность ТПТТ.....	51
3.5 Анализ погрешностей ТПТТ и методов их компенсации.....	54

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА ДЛЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ПОТОКОВ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

4.1 Общие вопросы проектирования ТПТТ.....	61
4.2 Методика выбора оптимальной структуры ТПТТ.....	61
4.3 Выбор основных элементов ТПТТ.....	65
4.3.1 Выбор теплопроводов ТПТТ.....	66
4.3.2 Выбор нагревательных элементов.....	66
4.3.3 Выбор термочувствительных элементов.....	67
4.3.4 Выбор измерительных схем и микропроцессорных устройств ТПТТ.....	67
4.4 Параметрическое проектирование ТПТТ.....	68
4.4.1 Общие вопросы параметрического проектирования ТПТТ.....	68
4.4.2 Формализация задачи проектирования ТПТТ по критерию чувствительности и линейности статической характеристики.....	69
4.4.3 Формализация задачи проектирования по критерию точности и быстродействия.....	70
4.5 Примеры практического применения ТПТТ для систем контроля параметров потоков жидкостей и газов.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	88
ЛИТЕРАТУРА.....	89

Введение

В настоящее время тепловые преобразователи широко применяются в различных системах контроля и управления скоростью и расходами потоков жидкостей и газов. По принципу построения тепловые преобразователи подразделяются на калориметрические, теплового пограничного слоя и термоанометрического типа. К тепловым преобразователям потоков жидкостей и газов со стороны систем контроля и управления предъявляются высокие требования по точности, чувствительности, надежности, стоимости и технологичности изготовления. Кроме того, ряд систем контроля и управления требуют, чтобы преобразователи параметров потоков жидкостей и газа были многофункциональными и позволяли контролировать такие параметры потоков жидкостей и газов как скорость, расход, температура и направление, причем для газов как в трубопроводных, так и в открытых потоках воздуха, например, потоки горизонтального ветра.

Указанным требованиям в полной мере удовлетворяют тепловые преобразователи термоанометрического типа (ТПТТ), которые имеют высокую чувствительность, точность, надежность и экономическую эффективность.

Однако в публикациях отечественных и зарубежных ученых недостаточно уделено внимания анализу принципов построения ТПТТ, их математическим моделям и основным характеристикам, методам их расчета и проектирования. Кроме того, недостаточно разработаны и исследованы конструкции многофункциональных микропроцессорных тепловых преобразователей термоанометрического типа, что существенно ограничивает области их применения в различных системах контроля и управления.

Данная работа посвящена анализу и разработке принципов построения ТПТТ, анализу их основных характеристик, разработке методик структурного и параметрического проектирования ТПТТ и разработке новых конструкций многофункциональных микропроцессорных тепловых преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов в трубопроводах и для контроля скорости и направления горизонтального потока воздуха на основе ТПТТ.

ГЛАВА 1. Состояние и развитие тепловых методов и преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов.

1.1 Общие вопросы контроля параметров потоков жидкостей и газов.

В потоках различных жидкостей и газов необходимо контролировать скорость, расход, температуру, направление и наличие потока. Среди указанных параметров потоков основными являются скорость и расход потока и поэтому ниже анализируются существующие преобразователи скорости и расхода потока жидкостей и газов с целью возможности в конструкциях преобразователей одновременно контролировать кроме скорости и расхода направление, температуру и наличие потока.

Существующие преобразователи скорости и расхода жидкостей и газов [1,-10] широко используются для контроля и управления: жидкостными и газовыми топливноэнергетическими ресурсами; при создании и эксплуатации новых химикотехнологических производств, при охране окружающей среды и производственных помещений; в научно-исследовательских работах и в других отраслях науки и техники.

В настоящее время для контроля скорости и расхода жидкостей и газов наибольшее развитие получили следующие методы и преобразователи:

- переменного перепада давления;
- турбинные (тахометрические);
- гидродинамические;
- электромагнитные;
- преобразователи постоянного перепада давления;
- тепловые;

Основными требованиями к преобразователям параметров потоков жидкостей и газов являются:

- высокая точность измерения;
- высокая чувствительность при больших и малых скоростях потока;
- высокое быстродействие;
- стабильность характеристик;
- широкий диапазон измерений;
- высокая надежность;
- технологичность измерения;
- малые габариты и вес

- малая стоимость.

Рассмотрим кратко возможности вышеуказанных преобразователей для созданий многофункциональных преобразователей параметров потоков жидкостей и газов. Хотя преобразователи расхода переменного перепада давления [1, 2] получили весьма широкие применения при контроле расходов различных жидкостей и газов (до 75 % от общего числа применяемых расходомеров), однако для контроля кроме расхода других параметров потоков эти преобразователи не получили распространения.

Турбинные преобразователи [1,3] получили достаточно широкое применение для контроля расхода жидкостей и газов и особенно в конструкциях счетчиков количества [4]. При их применении для контроля расходов потоков жидкостей и газов наличие подвижного элемента (ротора турбины), а также трущихся и контактирующих элементов снижает надежность таких расходомеров. Кроме того, весьма сложно и трудоемко изготавливать турбины для преобразователей расхода в трубопроводах малого диаметра.

Гидродинамические преобразователи расхода основаны на динамическом взаимодействии потока и зонда [5]. Ввиду простоты конструкции, низкой стоимости данные расходомеры широко используются. Однако, показания данных расходомеров зависят не только от расхода (скорости) потока, но и от плотности, вязкости, теплопроводности, электропроводности и других параметров контролируемого потока жидкости и газа. Кроме того, выходной сигнал зависит от формы и размеров зонда и режима его обтекания. Кроме того, данные преобразователи не получили применения для контроля направления и наличия потока.

Электромагнитные преобразователи расхода [14] по принципам построения бывают кондукционные, индукционные и пондеромоторные. Недостатками электромагнитных преобразователей расхода для контроля расходов жидкостей является непригодность для жидкостей с электрической проводимостью менее 10^{-5} См/м (то есть большинство органических жидкостей и газы). Именно это ограничивает их применение при контроле параметров потоков жидкостей и газов.

Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры) позволяют успешно контролировать расходы жидкостей и газов в трубопроводах [6]. Однако, недостатки ротаметров: большие потери давления, неприменимость в нестационарных потоках, вертикальное рабочее положение, зависимость от вязкости ограничивают их применение для контроля различных параметров потоков жидкостей и газов.

Тепловые расходомеры по принципу действия подразделяются на калориметрические, пограничного теплового слоя и термоанемометрические [9,10]. Все указанные типы тепловых расходомеров применяются для контроля расходов жидкостей и газов. Достоинствами тепловых расходомеров являются: высокая чувствительность особенно при малых скоростях потоков, возможность измерения расходов агрессивных жидкостей и газов при высоких давлениях и температуре. Однако, тепловые расходомеры имеют динамические погрешности из-за тепловой инерционности элементов расходомера и нелинейность статических характеристик. Указанные недостатки до настоящего времени ограничивали широкое применение тепловых преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов.

Краткий анализ современных преобразователей расхода, применяемых для контроля скорости и расходов показывает, что к настоящему времени разработано достаточное количество преобразователей расхода жидкостей и газов [1-10], однако усовершенствование систем контроля и управления параметрами потоков жидкостей и газов ставит перед разработчиками, повышенные метрологические требования, а также необходимость расширения функциональных возможностей. В настоящее время требуются многофункциональные преобразователи параметров потоков жидкостей и газов, которые удовлетворяя вышеприведенным требованиям и позволяли бы одновременно давать информацию о многих параметрах потока (температура, давление и другие), направлении и наличии потока, при этом конструкция и измерительная схема преобразователя должна легко стыковаться с микропроцессорными устройствами, которые также существенно могут улучшать метрологические и эксплуатационные характеристики преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов [11].

Известны преимущества тепловых преобразователей такие как: высокая чувствительность, широкий диапазон измерения, возможность измерения скорости и расхода потоков любых жидкостей и газов, малые потери давления и другие дают основание считать, что тепловые преобразователи среди существующих преобразователей являются наиболее перспективными для разработки многофункциональных преобразователей для контроля параметров потоков жидкостей и газов в различных областях их применения.

В тепловых преобразователях расхода обязательным элементом является термочувствительный элемент, который при определенной схеме измерения может давать информацию и о температуре потока газа. Известны также отдельные конструкции преобразователей направления и наличия потока газов и жидкостей [12,13]. Однако, до настоящего времени не разработаны многофункциональные тепловые преобразователи со встроенными микропроцессорными комплектами, которые позволили бы существенно усовершенствовать тепловые преобразователи, расширить их функциональные возможности и

широко применять их в измерительных системах контроля и управления параметрами потоков жидкостей и газов. С целью совершенствования тепловых преобразователей параметров потоков жидкостей и газов и разработки новых конструкций ниже анализируются принципы построения тепловых преобразователей расхода и разрабатывается методика выбора структуры тепловых преобразователей.

1.2. Анализ принципов построения тепловых преобразователей скорости и расхода.

Тепловые преобразователи расхода, как указывалось выше, подразделяются на следующие основные типы: калориметрические, теплового пограничного слоя и термоанемометрические [1,10]. Принцип действия тепловых преобразователей расхода газов и жидкостей основан на нагреве потока или тела, помещенного в поток и измерении разности температур от теплового воздействия на поток или тела, контактирующего с потоком. Основными элементами тепловых преобразователей расхода являются: теплопровод (ТП), нагревательный элемент (источник теплового воздействия) НЭ; термочувствительный элемент (ТЧЭ); измерительная схема(ИС).

Принципиальная схема теплового преобразователя калориметрического типа показана на рис 1.1 [14].

Нагревательный элемент НЭ выполнен в виде спирали из нихромовой проволоки. С целью упрощения в качестве ТЧЭ показаны 2,3- термоэлектрические термочувствительные элементы, которые соединены дифференциально и выходной сигнал их $U_{вых}$ пропорционален разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$

В общем случае измеряемая разность температур ΔT равна:

$$\Delta T = \frac{I_{НЭ}^2 R_{НЭ}}{C_p G}, \quad (1.1)$$

где: $I_{НЭ}$ - ток через НЭ;

$R_{НЭ}$ - сопротивление НЭ;

C_p - теплоемкость газа или жидкости;

G – расход.

Формула (1.1) имеет место, если исключены все потери тепла благодаря тщательной тепловой изоляции трубопровода и ТЧЭ 2 и 3 измеряют средние по сечению температуру потока до нагрева T_1 и после нагрева T_2 .

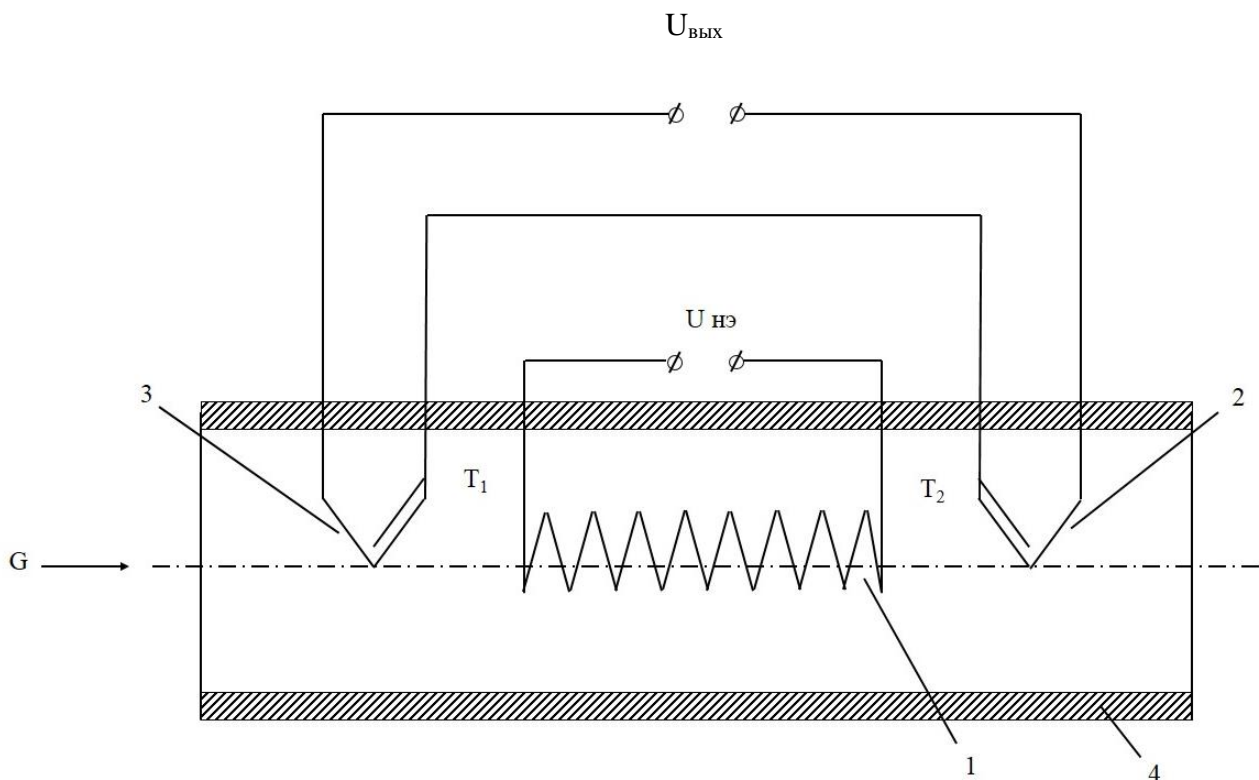


Рис 1.1. Принципиальная схема теплового преобразователя калориметрического типа: 1-НЭ; 2,3 –ТЧЭ; 4-ТП.

На основе нагрева потока калориметрические расходомеры пригодны для контроля малых расходов жидкостей и газов. Известны примеры применения калориметрических тепловых расходомеров для контроля малых расходов калия [15], воздуха [16], двухфазной жидкости [17] и другие. Имеются примеры усовершенствования калориметрических расходомеров путем применения для нагрева потока сверхвысокочастотного, инфракрасного и индукционного нагрева (18). Однако калориметрические расходомеры имеют недостаток – весьма малое быстродействие, которое ограничивает их применение в системах контроля и управления расходами жидкостей и газов.

Кроме того, калориметрические расходомеры при больших расходах, потребляют большую мощность нагрева, при этом контролируемый поток необходимо равномерно нагревать по всему сечению, а так же необходима контролировать среднюю по сечению температуру потока до и после нагрева. Все это усложняет конструкцию теплового преобразователя калориметрического типа

и ограничивает его широкое применение. Калориметрические расходомеры будут находить применение в тех случаях, где имеется обоснованная потребность в подобных конструкциях.

Принципиальная схема конструкции теплового преобразователя теплового пограничного слоя показана на рис.1.2

В данной конструкции в отличие от преобразователей калориметрического типа нагревательный элемент 1, термочувствительные элементы до нагрева 2 и после нагрева 3 расположены на наружной поверхности трубки 4. Таким образом, термочувствительные элементы 2 и 3 измеряют температуры внешней поверхности трубки 4 преобразователя. При отсутствии потока ($G=0$) и при наличии газа внутри трубы при включенном нагревательном элементе 1 распределение температуры в зоне нагрева $T'(x)$ относительно координаты $x=0$ имеет симметричный характер и ТЧЭ 3 измеряет температуру T_2' . При наличии потока ($G \neq 0$) протекающий поток в результате теплообмена смещает распределение температуры $T(x)$ в зоне нагрева и распределение температуры имеет вид $T''(x)$ и ТЧЭ 3 измеряет температуру T_2'' , которая отличается от T_2 и разность температур $\Delta T = T_2'' - T_1$ является мерой расхода G . При этом, термочувствительный элемент 2 измеряет температуру потока благодаря хорошему тепловому контакту и отсутствию в данном месте распределения температуры. Так как НЭ расположен на наружной поверхности трубки 4, а газы имеют невысокую теплопроводность, то в отличие от калориметрических расходомеров поток газа не прогревается в зоне нагрева, а прогревается только тонкий пограничный слой между трубкой 4 и потоком газа или жидкости. Именно этот пограничный слой и определяет характер распределения температуры $T(x)$.

Имеются много примеров применения тепловых расходомеров пограничного слоя для контроля малых расходов газов [19,20]. Достоинствами данного типа тепловых расходомеров является высокая чувствительность при малых расходах, неконтактность измерения.

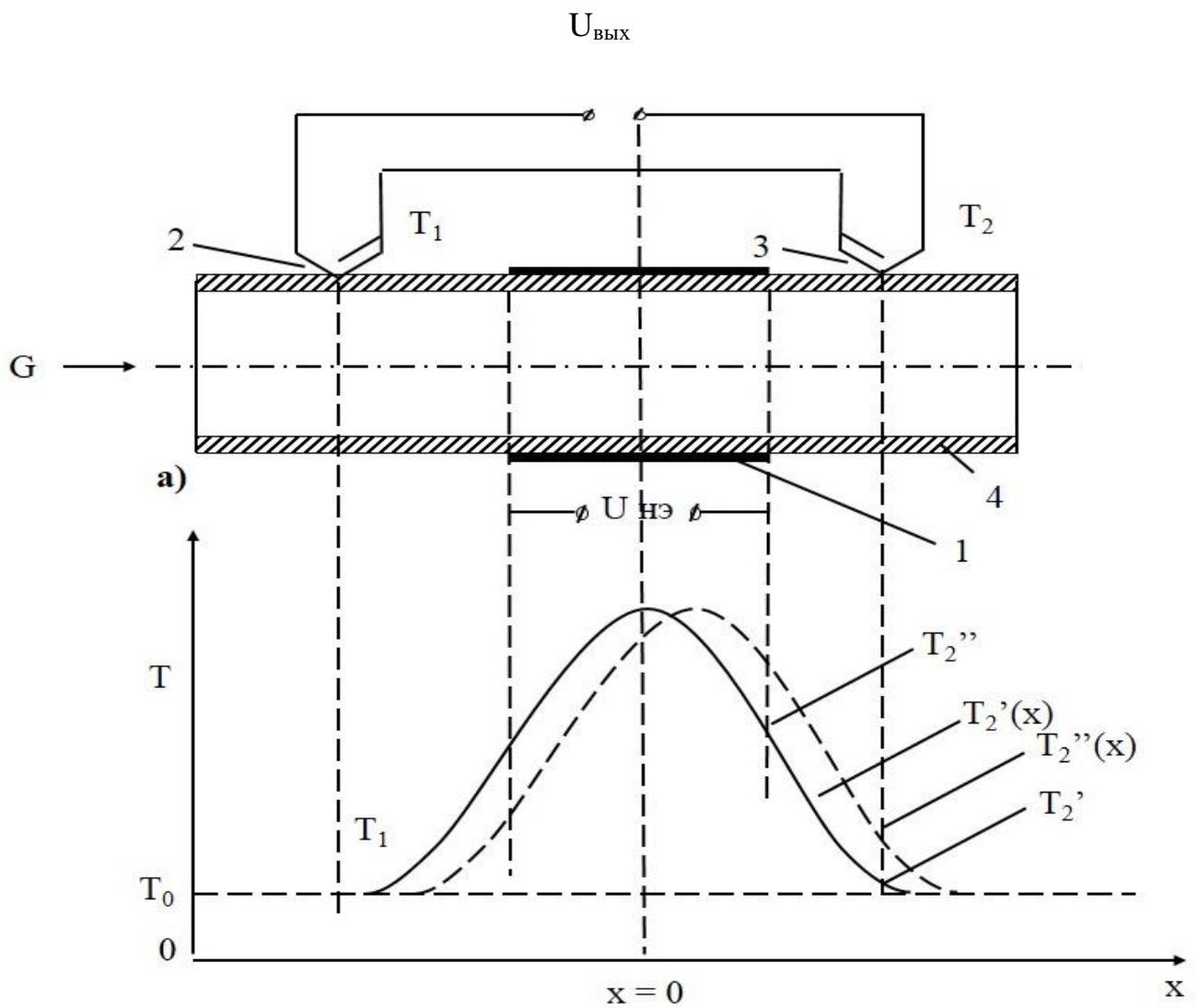


Рис 1.2. Принципиальная схема преобразователя теплового пограничного слоя (а) и график изменения температуры $T(x)$ вдоль наружной стенки трубы преобразователя (что позволяет измерять расходы агрессивных и токсичных газов).

На основании данного типа тепловых расходомеров могут быть разработаны многофункциональные расходомеры, например, конструкция на рис.1.3 позволяет контролировать как расход, так и наличие и направления потока при симметричном расположении ТЧЭ 2 и 3 относительно НЭ.

$U_{\text{вых}}$

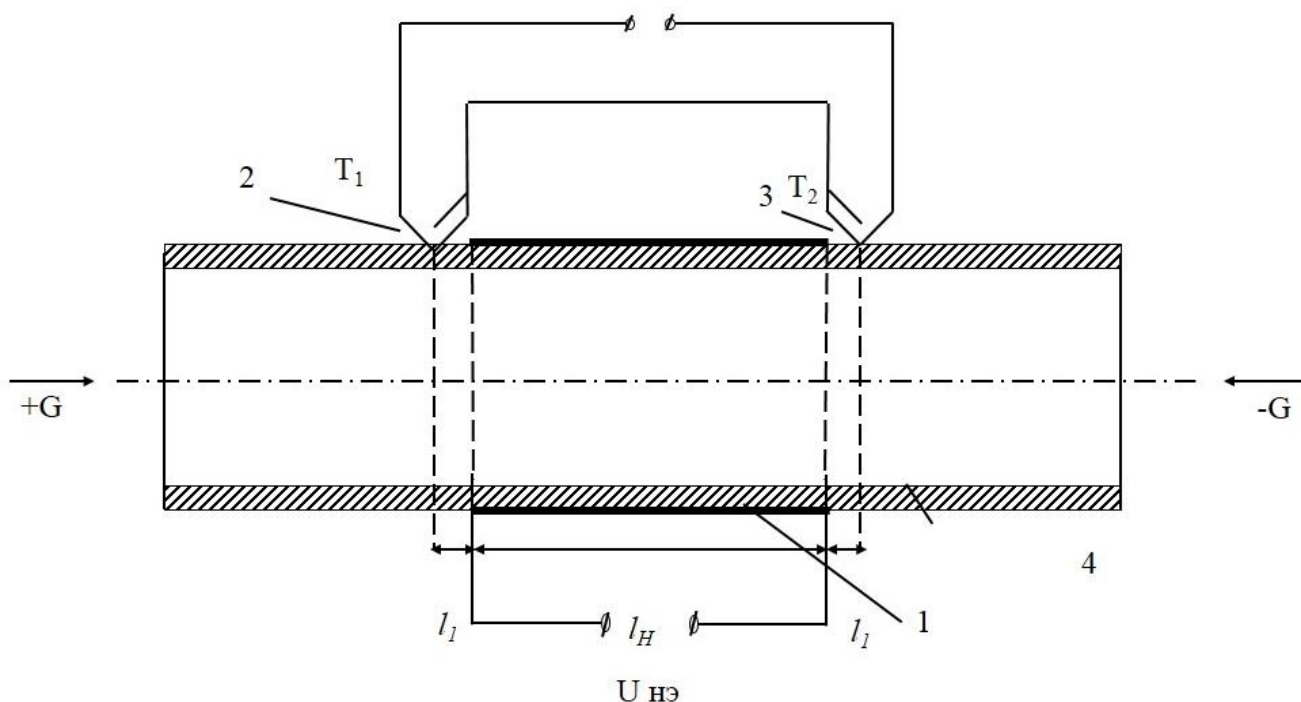


Рис. 1.3 Принципиальная схема преобразователя теплового пограничного слоя для контроля расхода, наличия и направления потока G .

При отсутствии потока газа или жидкости ($G=0$) благодаря симметрии распределения температуры $T(x)$ вдоль наружной стенки трубки 4 разность температур $T_2-T_1=\Delta T=0$. При изменении направления потока с $+G$ на $-G$ будет изменяться знак разности температур ΔT , что позволит получить информацию о направлении потока. Однако, данные преобразователи имеют весьма высокую инерционность, что ограничивает их применение в системах контроля и управления расходами газов. Преобразователи расхода термоанемометрического типа получили достаточно широкое распространение для контроля скоростей расходов газов в системах контроля и управления благодаря высокому быстродействию, чувствительности и простоте конструкции [1.12.13.2].

На рис.1.4 приведена принципиальная схема теплового преобразователя термоанемометрического типа.

Нагревательный элемент 1 термоанемометрического преобразователя может быть совмещенным с термочувствительным элементом 3 (нагрев осуществляется током протекающим по ТЧЭ 3 или косвенным (не совмещенный) в виде тонкой

металлической проволоки натянутой поперек контролируемого потока или спирали намотанной на тело ТЧЭ 3 (или специального теплопровода), которое омывается контролируемым потоком газа.

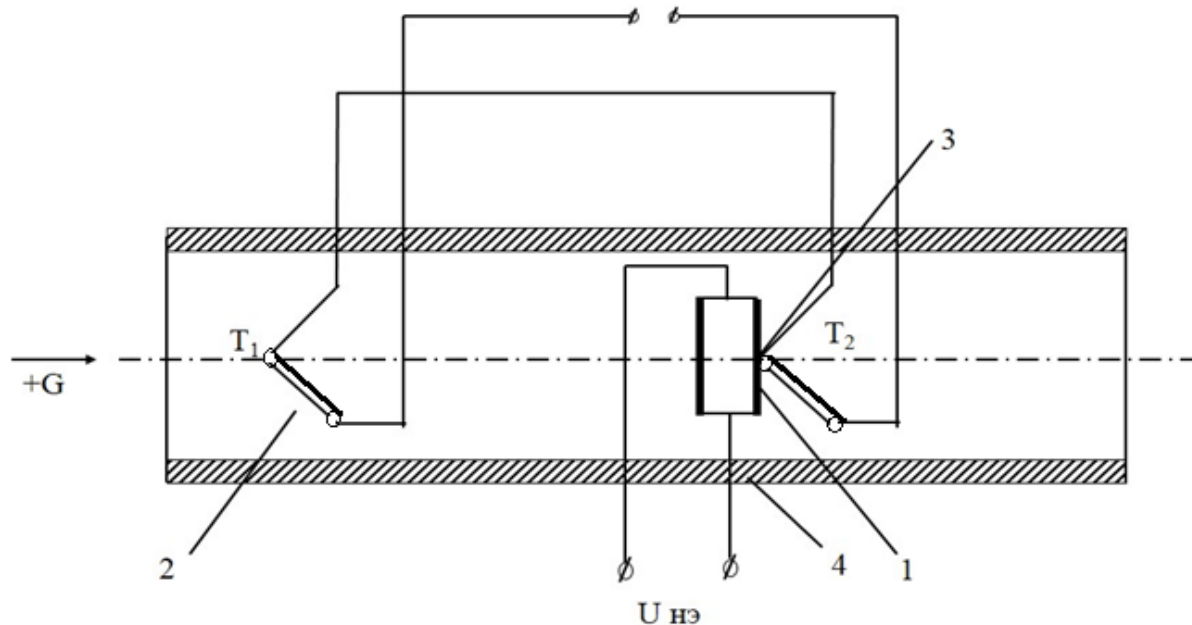


Рис.1.4. Принципиальная схема преобразователя расхода термоанемометрического типа.

В результате теплообмена нагретого ТЧЭ 3 с потоком газа изменяется температура T_2 которая и будет зависеть от скорости или расхода газа в трубопроводе 4. Для учета влияния температуры потока используется ТЧЭ 2 и разность температур $\Delta T = T_2 - T_1$ является мерой расхода. Термоанемометрические преобразователи обладают высоким быстродействием и чувствительностью и широко используются для контроля скорости газовых [24,25,29,30,31] и жидкостных [33,34,35,39,40] потоков в экспериментальных и производственных условиях. Например, при исследовании поля скоростей турбулентного потока различных теплоносителей, при исследовании турбо и гидрогенераторов, электрических машин постоянного и переменного тока, в которых необходимо контролировать скорости и расход охлаждающего агента (газа или воздуха) [41].

Известны примеры применения термоанемометрических преобразователей для контроля расхода газов и жидкостей в трубопроводах. Например, термоанемометрический преобразователь расхода в трубопроводах с применением в качестве термочувствительных элементов, основанных как на физическом эффекте Зеебека, так и на эффекте Пельтье [41]. На рис 1.5 приведена схема конструкции теплового преобразователя термоанемометрического типа, которая применялась при контроле расходов воды в насосных станциях[22]и в открытых каналах [23].

Конструкция теплового расходомера термоанемометрического типа представляет собой участок трубы 6, в котором последовательно друг за другом установлены защитные корпуса 4 и 5, в которых помещены ТЧЭ 2 и 3, при этом ТЧЭ 3 снабжен нагревательным элементом 1. В качестве ТЧЭ 2 и 3 использованы полупроводниковые термосопротивления, которые включаются в плечи мостовой измерительной схемы представленный на рис. 1.6. Плечи мостовой схемы 7 и 8 являются постоянными сопротивлениями.

Сопротивление 10 подключено параллельно компенсационному ТЧЭ 3 и служит для корректировки цепочки температурной компенсации в мостовой схеме. Переменное сопротивление 9 используется для корректировки выходного напряжения подаваемого на цифровой вольтметр 11. Питание мостовой схемы и цепи нагревательного элемента 1 осуществляли от блока питания 12.

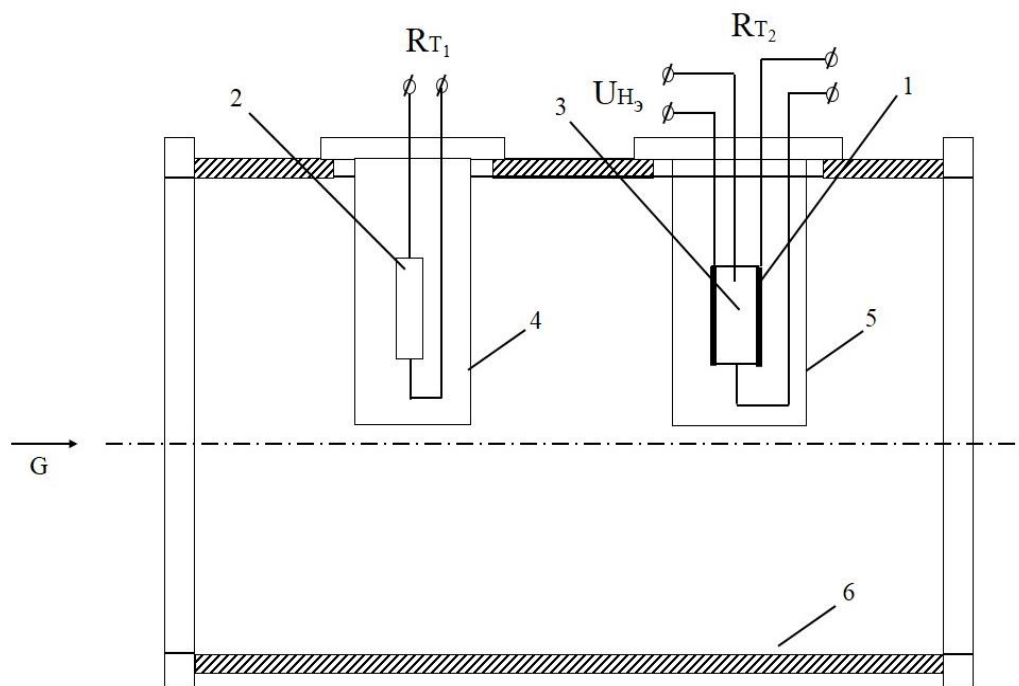


Рис. 1.5. Конструкция теплового преобразователя расходов воды термоанемометрического типа.

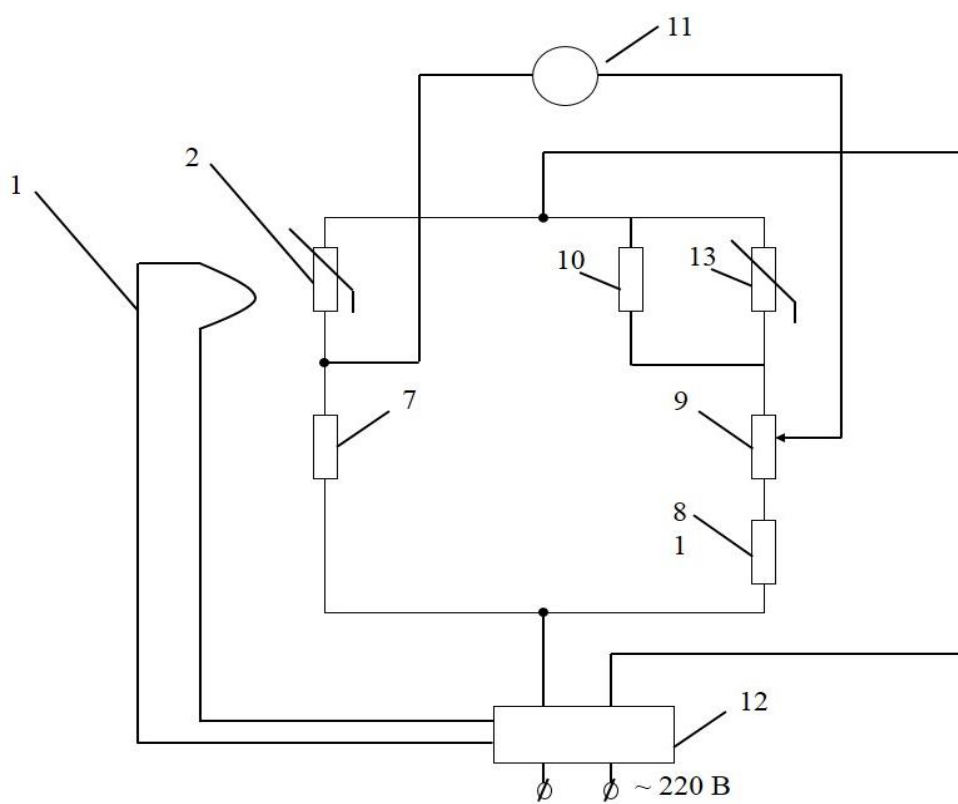


Рис. 1.6. Измерительная схема теплового расходомера термоанемометрического типа.

Разработанный тепловой расходомер термоанемометрического типа применялся для контроля расходов воды при скорости от – до 3м/с с погрешностью не более 2,5%. В работе [54] указывается, что на базе данного теплового расходомера можно разработать тепловые преобразователи двустороннего действия, которые могут стать многофункциональными преобразователями.

В основном тепловые преобразователи расхода термоанемометрического типа использовались для контроля скорости и расхода жидкостных потоков. А для газовых потоков наибольшее распространение получили термоанемометрического преобразователи прямого подогрева (без специального нагревательного элемента) в виде тонкой металлической проволоки, полупроводниковых сопротивлений и пленок [44].

Важно отметить, что термоанемометрические преобразователи обладают рядом достоинств, которые в известных работах недостаточно реализованы. Термоанемометрические преобразователи по существу являются зондовыми преобразователями [43]. В конструкции теплового расходомера термоанемометрический преобразователь с нагревательным 1 и основным термочувствительным элементом 3 (рис 1.6) располагаются в потоке и благодаря удалению их от стенки трубы 4, вся тепловая мощность нагревателя 1 участвует в теплообмене с потоком и не возникает паразитных потерь тепла, что в итоге обеспечивает термоанемометрическому преобразователю высокую точность измерения. Кроме того, среди калориметрических преобразователей и преобразователей пограничного слоя термоанемометрические преобразователи имеет более высокое быстродействие и чувствительность. В ряде работ показано [24-53], что на основе термоанемометрических преобразователей можно разработать многофункциональные тепловые расходомеры параметров потоков (скорость, расход, количество, температуру, наличие и направление потока). При разработке многофункциональных тепловых расходомеров необходимо тепловые преобразователи сочетать с микропроцессорными комплектами. Эти задачи легко реализуются на основе термоанемометрических преобразователей.

Все вышеизложенное показывает, что для создания многофункциональных тепловых преобразователей потоков газов и жидкостей наиболее перспективными являются тепловые преобразователи термоанемометрического типа в сочетании с микропроцессорными комплектами. Однако, готовые конструкции многофункциональных тепловых преобразователей пригодных для работа в комплекте с микропроцессорами еще недостаточно разработаны. Необходимо детально проанализировать принципы построения преобразователей термоанемометрического типа с целью выбора оптимальной структуры теплового преобразователя термоанемометрического пригодного для работы в комплекте трубчатого расходомера и далее эффективно стыкующийся с микропроцессорным устройством. С этой целью ниже анализируются принципы построения термоанемометрических преобразователей и выбор их оптимальных структур.

1.3. Принципы построения тепловых преобразователей скорости газов и жидкостей термоанемометрического типа.

Принцип действия преобразователей термоанемометрического типа как было указано выше, основан на зависимости теплового состояния (температуры) предварительно нагретого тела от скорости омывающего его потока газа или жидкости.

В термоанемометрических преобразователях в качестве термочувствительных элементов применяются тонкие металлические нити [25,29,44], металлические и полупроводниковые пленки [31,32,33], металлические и полупроводниковые термоспротивления [37,38,43,44] и термоэлектрические преобразователи [14,18].

Термоанемометрические преобразователи используемые для контроля газовых и воздушных потоков часто называются просто «термоанемометрами». Эти преобразователи в основном прямого подогрева (без дополнительного нагревательного элемента) и в качестве ТЧЭ используют тонкие металлические проволоки, полупроводниковые термоспротивления и другие элементы.

На рис 1.7 а между двумя держателями (насадками) 3' и 3'' натянута тонкая металлическая нить длиной $l_n=3-4$ мм. Диаметр металлической нити порядка $d=(15-20)\cdot 10^{-6}$ м, материал нити-платина, вольфрам и другие. Конструкция преобразователя на рис 1.7, б аналогична и отличается конструкционной установкой подводящих проводов 2. В конструкции преобразователя на рис 1.7, в, между двумя держателями 3' и 3'' с помощью подводящих проводов 2 укреплено бусинковое полупроводниковое сопротивление 1. А на рис. 1.7, г на подводящих проводах 2 укреплено полупроводниковое сопротивление цилиндрической формы. В качестве измерительной схемы как правило используется мостовая схема, с помощью которой выходной ток или напряжение моста является мерой скорости потока. В данных конструкциях термоанемометрических преобразователей при отсутствии потока (особенно газа) происходит перегрев ТЧЭ и сложно осуществлять корректировку преобразователя. Данные конструкции преобразователей не обладают высокой чувствительностью к направлению потока.

Термоанемометрические преобразователи применяемые для контроля жидкостных потоков являются преобразователями для измерений средней скорости и характеристик турбулентности потока. Применение вышеуказанных конструкции (рис 1.7) термоанемометрических преобразователей в жидкостных потоках ограничено из-за низкой чувствительности, что объясняется малым перегревом ТЧЭ относительно температуры жидкостного потока. Погрешность также увеличивается из-за электрохимических эффектов, появляющихся между нитью и жидкостью, поэтому в ряде работ используют пленочные преобразователи имеющего форму клина, конуса и сферы.

Для научно-исследовательских работ, а также применения их в системе контроля в промышленности широко применяются термоанемометрические преобразователи, выпускаемые фирмами Dantec-Electronic (Дания), TSI Inc (США), Detlab (Франция) и другие.

Термоанемометрические преобразователи фирмы Dantec-Electronic [45,46] позволяют контролировать скорости и расходы водных потоков при скоростях от 1-

25 м/с при температуре до 100 С. Одноканальный прибор на основе термоанемометрического преобразователя 55 МСТА фирмы Dantec-Electronic содержит мостовую схему, блок усилителей, блоки температурной компенсации и линейризации. Данный прибор может измерять и температуру потока и имеет цифровой выходной прибор.

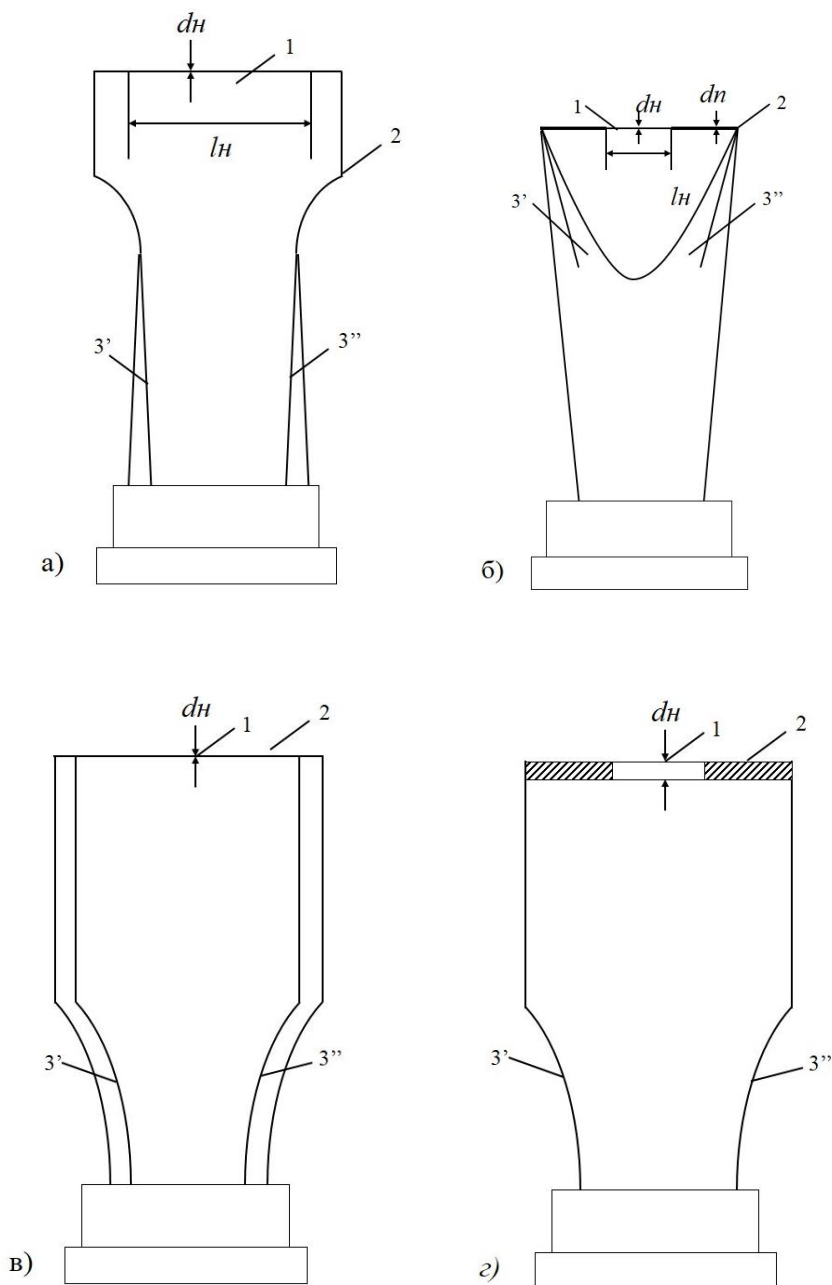


Рис.1.7. Конструкции термоанемометрических преобразователей без косвенного нагрева. 1-термочувствительный элемент; 2 – подводящие провода; 3',3'' - держатели

На рис.1.8 приведена измерительная схема прибора типа 5600 СТА, которая измерительную информацию выводит на микропроцессор. Термочувствительный элемент $R_{тап}$ термоанемометрического преобразователя включен в одно из плеч мостовой схемы 1, состоящей еще из постоянных сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , выход моста 1 подключен ко входу усилителя 2, далее к мосту общего назначения 3 на выходе которого подключены АЦП 4, блок среднеквадратического значения 5 и цифровой индикатор 6, а также блок интегральный значений через 7, подключенный через фильтр 8 и линейризатор 9.

Термоанемометрический преобразователь фирмы TSI Inc модели IFA 100 представляет собой трехкомпонентный проволочный зонд, размещаемый в контролируемом потоке. Аналоговый сигнал термоанемометрического преобразователя преобразуется в цифровую форму и обрабатывается с помощью компьютеров [47] термоанемометрический преобразователь, содержал два ТЧЭ из платиновых проволочек длиной 5мм и диаметром $15 \cdot 10^{-6}$ м.

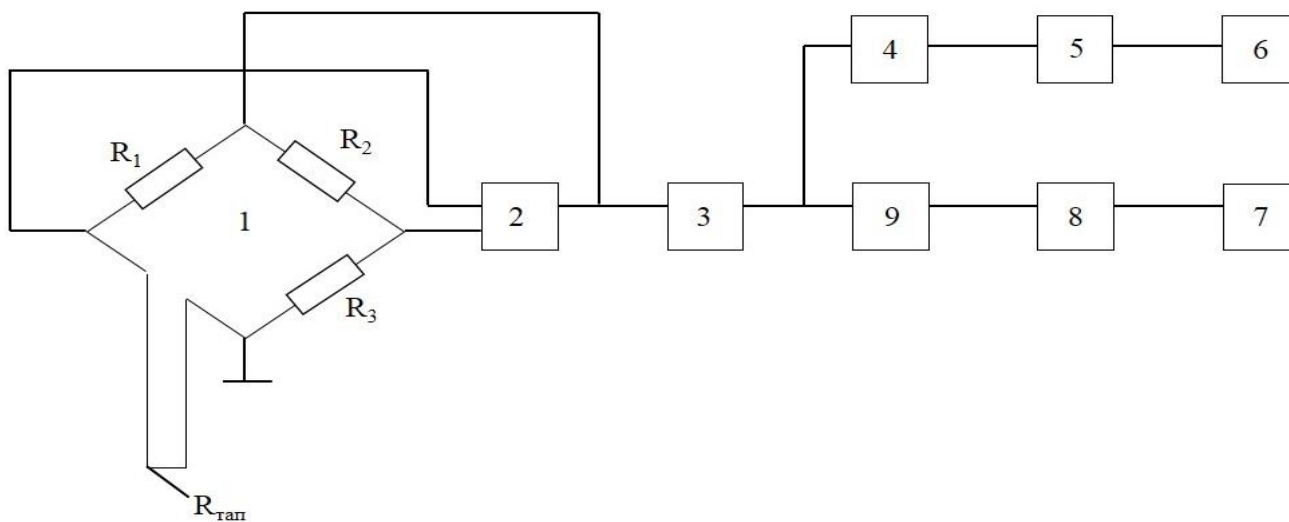


Рис. 1.8. Измерительная схема прибора типа 5600 СТА.

Термочувствительные элементы включались в плечи двух мостовых схем, один из которых был предназначен для контроля скорости потока, а другой мост для контроля направления потока [44].

Термоанемометрические преобразователи без дополнительных источников нагрева не позволяют точно измерять малые скорости потоков и поэтому разработчики с целью повышения чувствительности стали применять в качестве ТЧЭ полупроводниковые термосопротивления, а также дополнительные (косвенные) нагревательные элементы.

В ряде работ показано [26,29,42,43], что дополнительные нагревательные элементы в термоанемометрических преобразователях существенно повышают чувствительность, особенно при их применении для контроля скорости потоков газов и жидкостей. На рис. 1.9 представлены наиболее распространенные конструкции термоанемометрических преобразователей с косвенным нагревом.

На рис. 1.9, а между двумя подводщими проводами 4' и 4'' натянута тонкая металлическая нить нагревательного элемента 2, а в центре этого нагревательного элемента в хорошем тепловом контакте укреплен горячий спай термоэлектрического преобразователя 1. Преобразователь применялся для контроля расхода и скорости газовых и жидкостных потоков [41,63].

В конструкции представленной на рис 1.9 б в качестве ТЧЭ используется бусинковое (шарообразное) полупроводниковое термосопротивление 1, а нагревательный элемент 2 выполнен в виде спирали наматываемой микропроводом или вокруг ТЧЭ 1 или вокруг металлической гильзы, в которой в хорошем тепловом контакте укреплен с ТЧЭ 1. В термоанемометрическом преобразователе с косвенным нагревом ТЧЭ 1 и НЭ 2 позволяют полупроводниковому сопротивлению работать в режиме малых токовых нагрузок (по сравнению с преобразователем прямого подогрева на рис.1.9, в,г), что во-первых расширяет диапазон контролируемых расходов и скоростей, а во-вторых повышает надежность преобразователя.

В преобразователе на рис.1.9, в, используется одновременно и ТЧЭ 1 и НЭ 2, основанные на термоэлектрических эффектах. Термочувствительный элемент 1 работает на основе эффекта Зеебека, а НЭ 2 на основе эффекта пельтье.

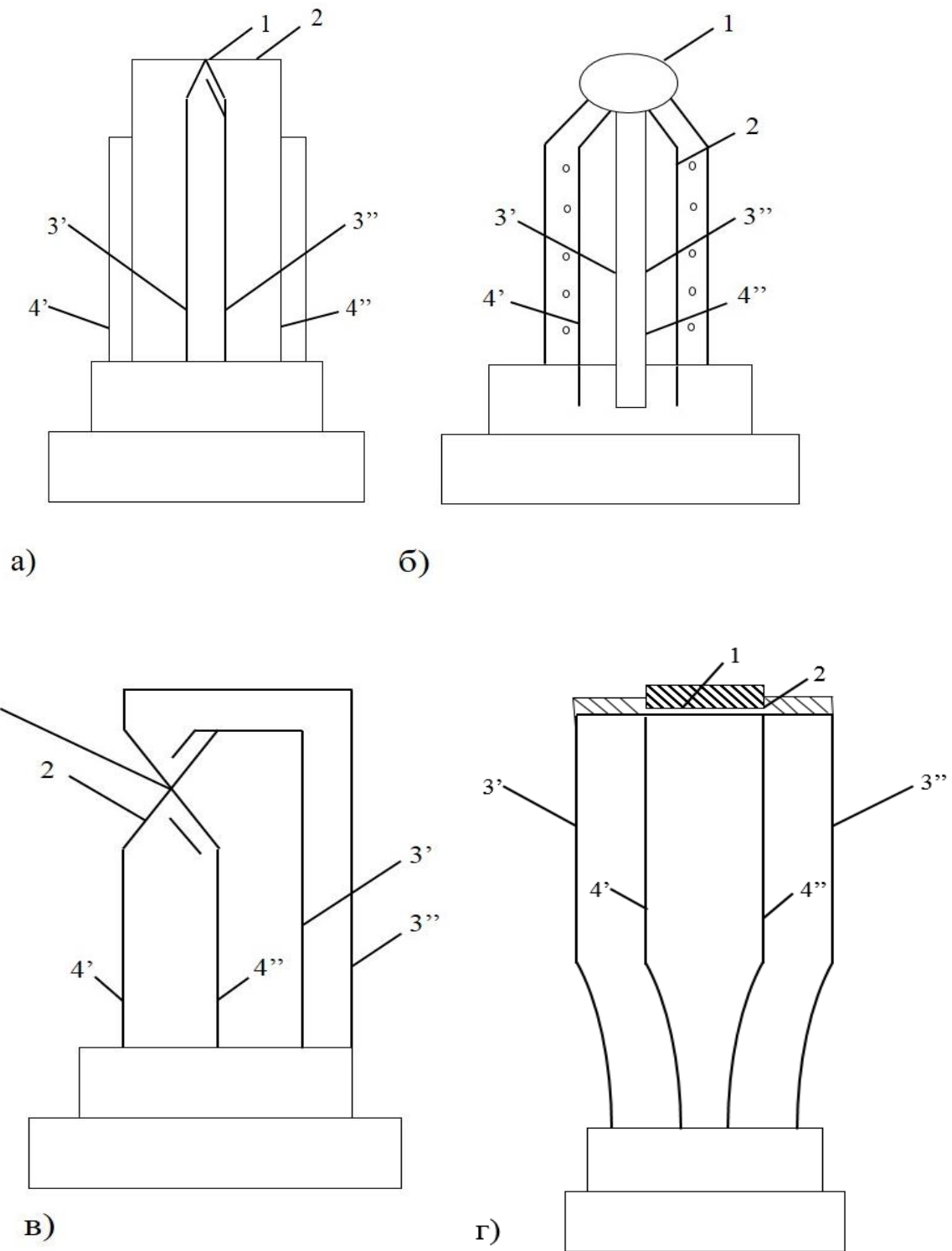


Рис.1.9. Конструкции термоанемометрических преобразователей с косвенными нагревом.

1-термочувствительный элемент; 2- нагревательный элемент; 3', 3'' – подводящие провода термочувствительного элемента; 4', 4'' – подводящие провода нагревательного элемента.

В термоанемометрическом преобразователе на рис.1.9, г в качестве ТЧЭ 1 используется полупроводниковое термосопротивления цилиндрической формы (например типа ММТ-1, КМТ-1 и другие), на тело которого наматывается провод нагревательного элемента 2.

Одним из недостатков описанных преобразователе термоанемометрического типа является невозможность определения направления потока газа или жидкости. Поэтому в ряде работ были предложены конструкции термоанемометрических преобразователей скорости и направления потока, в которых с помощью специальных устройств или элементов создавались разные условия теплообмена ТЧЭ и НЭ в зависимости от направления потока газа или жидкости [51,52,53]. На рис. 1.10 представлен термоанемометрический преобразователь [12] с нетеплопроводными подвижными пластинами 3 (которые создают разные условия теплообмена ТЧЭ 1 и ТЧЭ 2) встроенные в конструкцию теплового расходомера контролирующего расход и направление потока газа или жидкости. В конструкцию расходомера на рис. 1.11 внутри трубопровода 7 поперек потока установлены два идентичных ТЧЭ 1 и 2 защитных капсулах 5 и 6. Между ТЧЭ 1 и 2 по середине установлены тепловые экраны, выполненные из нетеплопроводных пластин 3, которые могут поворачиваться вокруг оси 4 в зависимости от направления потока и обеспечивать охват одного из ТЧЭ 1 или 2 под действием напора потока. ТЧЭ 1 и 2 в виде термометров сопротивления включены в схемные плечи мостовой измерительной схемы. В зависимости от направления потока один из ТЧЭ нагревается больше током протекающим в его цепи и изменяет свое сопротивление больше чем другой и на выходе мостовой схемы появляются выходное напряжение, знак которого дает информацию о направлении потока, а величина дает информацию о значении расхода и скорости.

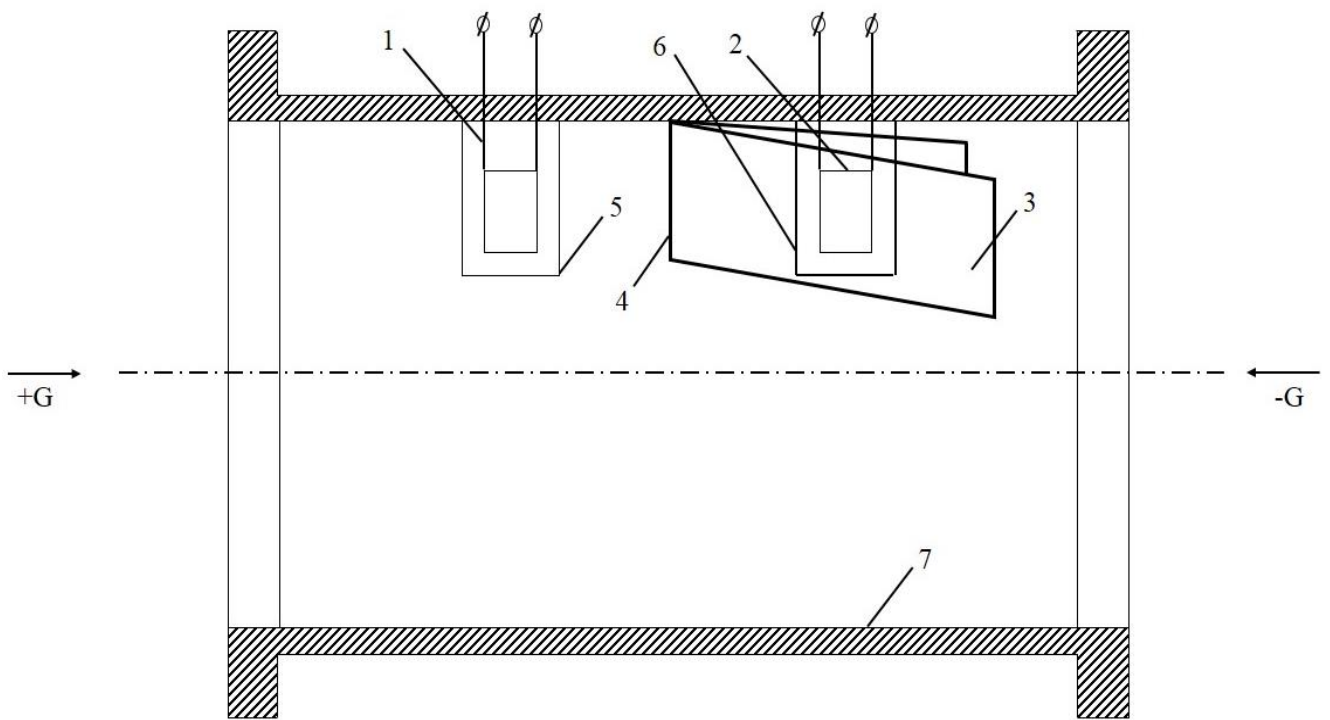


Рис.1.10 Термоанемометрический преобразователь расхода с подвижными нетеплопроводными пластинами.

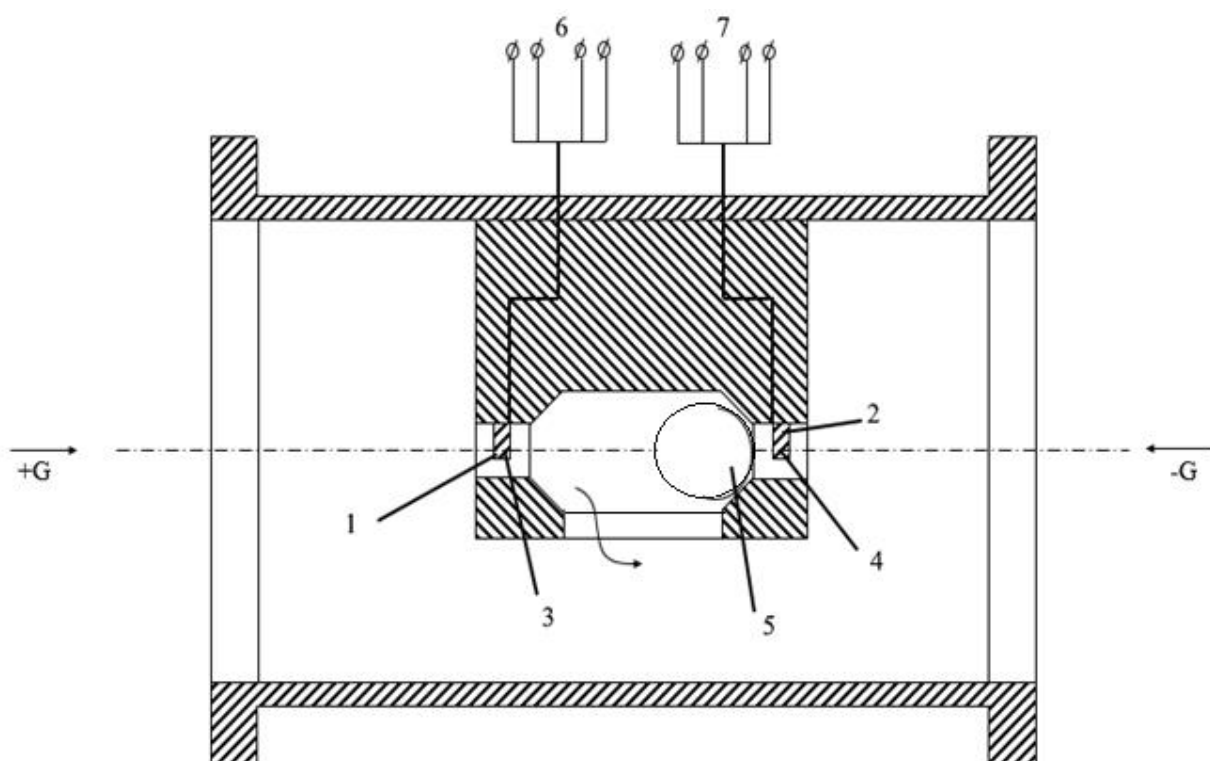


Рис.1.11. Термоанемометрический преобразователь расхода с подвижным шариком в расширенном Т – образном канале.

Термоанемометрический преобразователь представленный на рис 1.11 выполнен в виде Т-образного канала с двумя входными участками, между которыми имеется расширенный участок с выходными отверстиями.

В преобразователе имеются элементы 1, 2, 3 и 4, выходы которых 6 и 7 позволяют им соединяться с мостовой измерительной схемой и с блоком питания для нагревательных элементов.

При подаче тока на НЭ 3 и НЭ 4 нагреваются ТЧЭ 1 и ТЧЭ 2. Под воздействием потока $+G$ или $-G$ шарик 5 займет одно из крайних положений, при этом, если поток имеет направление $+G$ ТЧЭ 1 с НЭ 3 обдувается и его температура в результате теплообмена уменьшается, а ТЧЭ 2 не обдувается и перегревается и его температура повышается. В результате изменяются сопротивления ТЧЭ 1 и ТЧЭ 2 и на выходе мостовой схемы возникает выходное напряжение, характеризующее расход $+G$ и направление потока [13].

Весьма интересной является конструкция расходомера представленная на рис.1.12, в которой термоанемометрические преобразователи с ТЧЭ 1 и ТЧЭ 2 расположены на определенном расстоянии друг от друга вдоль оси трубопровода и разделены гидравлическим сопротивлением (диафрагмой) 7 [54].

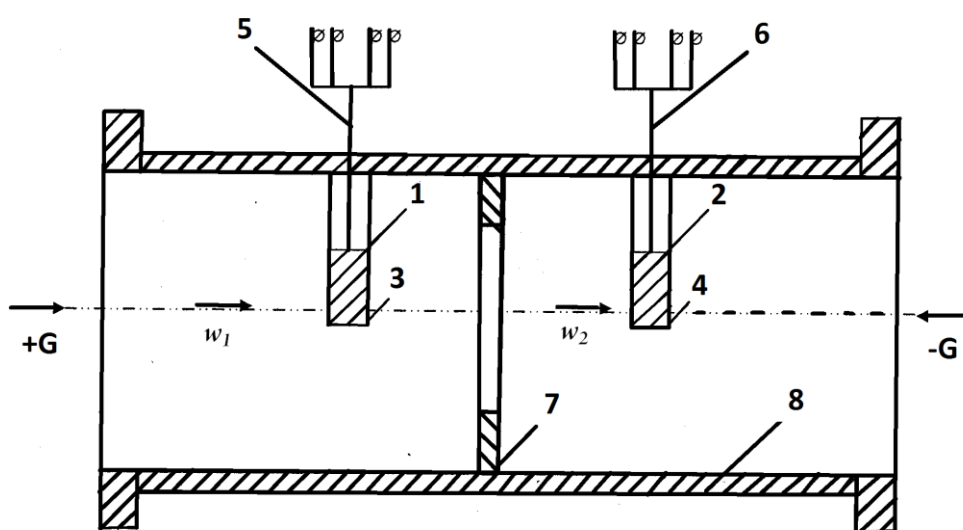


Рис. 1.12. Термоанемометрический преобразователь расхода с сужающим устройством (диафрагмой): ТЧЭ 1 и 2;

При нагреве с помощью НЭ 3 и НЭ 4 при отсутствии потока ($G \neq 0$) нагреты до одинаковой температуры и на выходе мостовой схемы, в смежные плечи которой включены ТЧЭ 1 и ТЧЭ 2, выходное напряжение равно $U_{\text{вых}}=0$.

При наличии потока ($G \neq 0$) скорость потока до диафрагмы меньше скорости потока после диафрагмы из-за сужения струи ($w_1 < w_2$).

В результате ТЧЭ 1 и ТЧЭ 2 оказываются в разных условиях теплообмена и на выходе мостовой схемы возникает напряжение $U_{\text{вых}}$, значение которого дает информацию о расходе, а знак дает информацию о направлении потока.

Аналогичная конструкция теплового преобразователя термоанемометрического типа с гидравлическим сопротивлением приведена на рис. 1.13 [55].

Среди тепловых преобразователей термоанемометрического типа, способных давать информацию о направлении и скорости разработана конструкция с подвижной заслонкой, которая является весьма эффективной в работе, а ее измерительная схема, имеющая

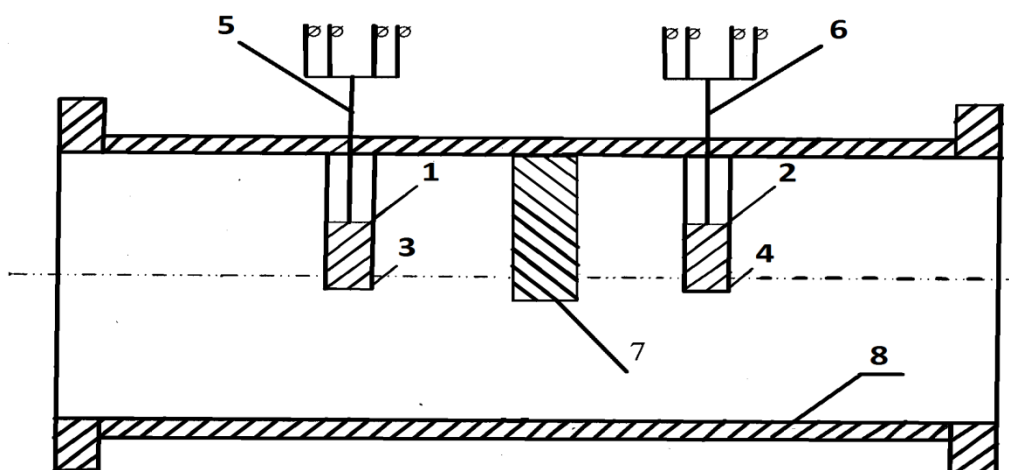


Рис. 1.13. Термоанемометрический преобразователь расхода с гидравлическим сопротивлением.

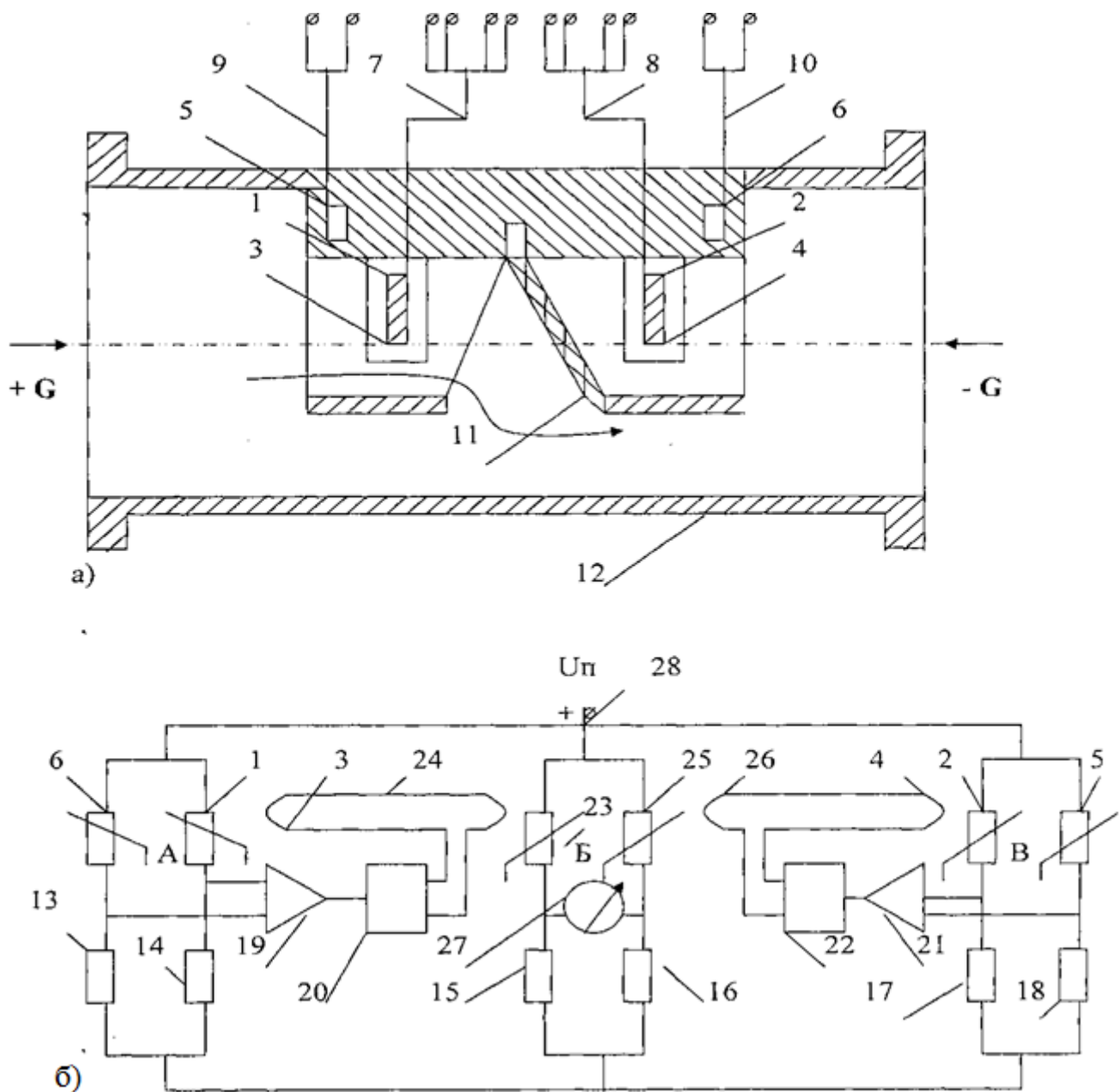


Рис. 1.14. Конструкция (а) и измерительная схема (б) термоанемометрического преобразователя с подвижной эластичной заслонкой.

Несколько мостовых схем позволяет, расширить функциональные возможности данной конструкции тепловых преобразователей.

В конструкции термоанемометрического преобразователя, на рис.1.14 измерительный участок выполнен в виде цилиндрического канала, в центре которого имеется клинообразный вырез с эластичной заслонкой 11, а до клинообразного выреза (слева направо) расположены ТЧЭ 1 с нагревательным

элементом 3 и после выреза расположен ТЧЭ 5 и ТЧЭ 6. Все термочувствительные и нагревательные элементы с помощью выводных проводов 7,8,9,10 соединены с измерительной схемой (рис.15 б) которая представляет собой три неуравновешенных моста А, Б, В, в смежные плечи которых включены ТЧЭ 1,2,5,6,23,25. В два других плеч мостов А, Б и В включены постоянные сопротивления 13,14,15,16,17 и 18, электронные усилители напряжения 19 и 21 предназначены для обработки сигналов мостов А и В и передачи его на усилители мощности 20 и 22, которые в свою очередь связаны с нагревательными элементами 3, 4, 24, 26. Выходной прибор 27 включен в диагональ моста Б. В исходном состоянии небольшой ток протекающий по НЭ 3, 4, 24, 26 нагревает ТЧЭ 1,2,23,25. При отсутствии потока жидкости или газа все ТЧЭ 1, 2, 23, 25 нагреты до одинаковой температуры и сопротивления их равны, а мосты А, Б, В находятся в уравновешенном состоянии и на выходе прибора 27 $U_{\text{вых}}=0$. При наличии потока, например $+G \neq 0$ заслонка 11 отклоняется в сторону потока и перекрывает путь доступу газа или жидкости в полость, где находится ТЧЭ 2. При этом ТЧЭ 1 охлаждается быстрее чем ТЧЭ 2, что приводит к разбалансу моста А и на его измерительной диагонали появляется сигнал, пропорциональный скорости потока. Полученный сигнал поступает в усилители 19 и 20 и тем самым повышается ток нагревательных элементов 3 и 24, в результате увеличивается температура термочувствительного элемента 1, который нагреваясь приводит мост А в равновесное состояние. Одновременно НЭ 24 повышает температуру ТЧЭ 23 моста Б, что приводит к его разбалансу. В результате на измерительной диагонали моста Б появляется сигнал, пропорциональный скорости потока, а его полярность соответствует нагреванию этого потока. Информация о направлении и величине скорости (расхода) отражается на выходном приборе 27.

Можно было еще рассмотреть другие термоанемометрические преобразователи, для контроля расхода, скорости, наличия и направления потока [62,63]. Однако, уже на основании вышерассмотренных можно сделать некоторые обобщения и наметить пути их дальнейшего усовершенствования с целью создания современных многофункциональных термоанемометрических преобразователей

параметров потоков газов и жидкостей. Принципиально, уже на основе конструкции преобразователя на рис.1.14 один из трех мостовых схем можно применять для одновременного контроля температуры потока, в то время как другие мосты будут давать информацию о скорости, наличии и направлении потока. Кроме того, если выходной сигнал моста Б подавать через АЦП на микропроцессор, то можно решить такие важные задачи как температурная компенсация и линеаризация статической характеристики. Кроме того, возможно также осуществлять динамическую коррекцию показаний преобразователя и существенно расширить диапазон преобразований. Однако, для решения данных задач необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования, на основании которых можно выбрать оптимальные ТЧЭ, НЭ, измерительные схемы, а также элементы, позволяющие контролировать наличие и направление потока. На основании анализа существующих конструкций термоанемометрических преобразователей скорости и направления можно систематизировать их конструкции по основным наиболее часто применяемым элементам. В результате вышеизложенного выявлено, что в качестве ТЧЭ применяют тонкие металлические нити, полупроводниковые термосопротивления в виде цилиндрических бусинок (шарообразных) форм, термоэлектрические преобразователи, тонкие металлические и полупроводниковые пленки и другие.

В качестве НЭ также применяются тонкие металлические нити, спирали из высокоомных микропроводов, сопротивления цилиндрической или шарообразной формы, тонкие металлические пленки и другие.

В качестве измерительных схем в основном применяют мостовые схемы, однако возможны и делительные схемы, дифференциальные схемы, измерительные схемы с микропроцессором и другие. В качестве элементов реагирующих на направление потока применяют поворотные нетеплопроводные пластины, шарики, заслонки, сужающие устройства, различные гидравлические сопротивления и другие.

Для исследования математических моделей термоанемометрических преобразователей важное значение имеет тип теплопровода, роль которого могут выполнять те же вышерассмотренные основные элементы (ТЧЭ и НЭ) или другие элементы. Поэтому можно указать, что в качестве теплопроводов в данных преобразователях могут быть тонкие металлические нити, пленки, а также металлические цилиндрические, шарообразные и другие элементы. При контроле газовых потоков термоанемометрические преобразователи часто используются без защитных гильз или других устройств. Однако, при контроле агрессивных газов и большинства жидкостных потоков необходимо ТЧЭ и НЭ помещать в специальные гильзы (цилиндрические, шаровые, конусные и другие). В качестве защитных гильз в термоанемометрических преобразователях получили распространение тонкостенные металлические трубки, цилиндры. В этих случаях в виде теплопровода будут иметь место цилиндрические однослойные или многослойные теплопроводы.

С целью выявления основных принципов построения ТПТТ, на основании которых могут быть созданы приборы для контроля параметров потоков газов в различных системах в главе IV приведены морфологические таблицы основных элементов ТПТТ: теплопроводов, термочувствительных элементов, нагревательных элементов и измерительных схем, на основе которых могут созданы новые многофункциональные преобразователи параметров потоков газов. Ниже приводится классификационная таблица возможных вариантов преобразователей для контроля параметров потоков газов. Конструкции приведенные в таблице 1.1, отражают принципы построения ТПТТ и многофункциональных преобразователей (МП) на их основе.

Анализ принципов построения ТПТТ и МП позволяет сделать следующие выводы:

1. Характерными конструктивными признаками ТПТТ и МП являются:

- а) наличие следующих основных элементов: теплопровода (ТП); нагревательного элемента (НЭ); термочувствительного элемента (ТЧЭ) и измерительной схемы (ИС);
- б) наличие элементов, реагирующих на направление и наличие потока.
- в) возможность контролировать температуру потока газа.

2. Роль элементов, реагирующих на направление и наличие потока заключается в создании определенных условий теплообмена для дифференциально установленных теплопроводов с НЭ и ТЧЭ в зависимости от направления и наличия потока газа или жидкости.

3. Роль ТЧЭ заключается в преобразовании как скорости так и температуры потока с помощью соответствующей измерительной схемы.

Зная роль тех или иных элементов в конкретной конструкции можно определить назначение преобразователя, основные характеристики, и преимущества при его применении в конкретной области.

В таблице 1.1.приведены вышеуказанные варианты МП на основе ТПТТ.

Таблица 1.1

Элемент изменяющий условия теплообмена при изменении направления потока.	Тип теплопровода	
	Тонкая металлическая проволока (ТМП)	Цилиндрический стрежневой (ЦС)
Подвижный экран (ПЭ)	<p>ТМП ПЭ Гр</p>	<p>ЦС ПЭ Гр ГЧЭ</p>
Подвижная заслонка (ПЗ)	<p>ПЗ</p>	<p>ПЗ</p>
Подвижный шарик (ПШ)	<p>ПШ</p>	<p>ПШ</p>
Гидродинамическое сопротивление (ГС)	<p>ГС</p>	<p>ГС</p>

Глава II. Математические модели тепловых преобразователей термоанемометрического типа.

2.1. Общие вопросы математических моделей тепловых преобразователей термоанемометрического типа.

В общем случае выходной сигнал преобразователей термоанемометрического типа формируется в результате теплообмена нагретого теплопровода в поперечном потоке под воздействием скорости потока газа и жидкости.

Обобщенную функциональную схему данного преобразователя можно представить в виде

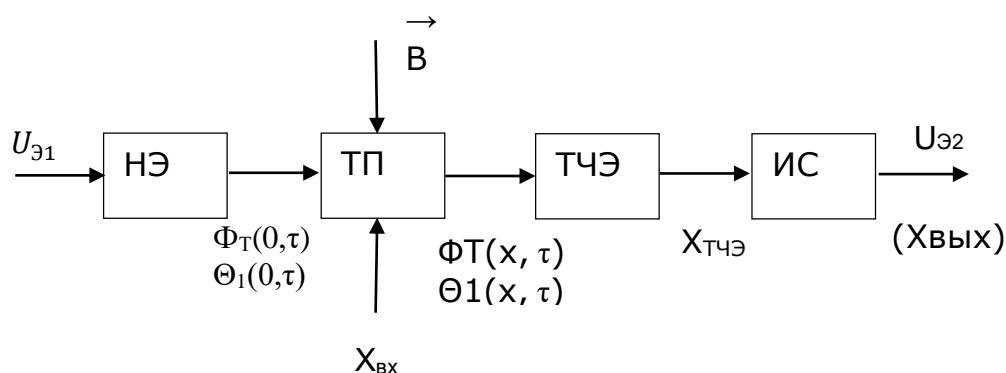


Рис. 2.1. Обобщенная функциональная схема теплового преобразователя термоанемометрического типа:

$U_{Э1}$ - напряжение питания НЭ;

$\Phi_T(0, \tau)$, $\Phi_T(x, \tau)$ - тепловые потоки от НЭ;

$\Theta_1(0, \tau)$, $\Theta_1(x, \tau)$ - температуры теплопровода ТП;

$X_{ТЧЭ}$ - выходная величина термочувствительного элемента;

ИС - измерительная схема;

$U_{Э2}$ - напряжение на выходе ИС;

x, τ - линейная и временная координаты;

$X_{\text{вх}}$ - входная величина (скорость или расход);

\vec{B} - неинформативные воздействия на теплопровод.

Согласно принципа работы преобразователя входная величина $X_{\text{вх}}$ воздействует на параметры распределения тепловых потока $\Phi_T(0, \tau)$ и температуры $\Theta_1(0, \tau)$ и в результате посредством оператора F_1 преобразуется в выходной сигнал.

Процесс преобразования $\vec{\Phi}(0, \tau) \rightarrow \vec{\Theta}(0, \tau)$ можно представить в виде

$$F_1(X_{\text{вх}}, \vec{B}) \cdot \vec{\Phi}_T(0, \tau) = \Theta_1(0, \tau)_{B_1} \quad (2.1)$$

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_1 \\ \dots \\ B_1 \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

где: B - различные неинформативные воздействия (температура, влажность и другие параметры контролируемой среды).

В целом на выходе преобразователя имеет место выходной сигнал $X_{\text{вых}}(\tau)$

$$X_{\text{вых}}(\tau) = F_2(\vec{B}) [F_1(X_{\text{вх}}, \vec{B}), \Phi_T(0, \tau) \dot{U}] \quad (2.3)$$

Функция (2.3) в общем виде выражает обобщенную математическую модель преобразователя. Для определения основных характеристик преобразователя необходимо определить функции операторов F_1 и F_2 . В дальнейшем с целью определения операторов F_1 и F_2 основное внимание уделяется нахождению математических моделей распределения $\Phi_T(x, \tau)$ и $\Theta(x, \tau)$ для основных типов конструкций представленных на рис. 2.1.

В главе I были рассмотрены принципы построения преобразователей скорости термоанемометрического типа, на основании которых тепловые системы рассматриваемых преобразователей можно свести к четырем основным типам: 1 - однородный протяженный цилиндрический теплопровод (на основе тонкой металлической нити) без дополнительного источника тепла 3 (рис.2.2,а); 2 -

неоднородный протяженный цилиндрический теплопровод (цилиндрической формы термосопротивление) без дополнительного источника тепла (рис.2.2,б); 3 - неоднородный протяженный цилиндрический теплопровод с дополнительным источником тепла (рис.2.2,в); 4 - сложный многослойный неоднородный цилиндрический теплопровод с дополнительным источником тепла (рис.2.2,г) (на основе физической модели, где ТЧЭ и НЭ помещены в защитную гильзу в виде отрезка металлической трубки).

Согласно принципа действия тепловых преобразователей термоанемометрического типа теплообмен между контролируемым потоком в трубопроводе 1 и нагретым теплопроводом (рис. 2.1.) происходит по всей длине тепловой системы (теплопровода 2) и поэтому существенную роль в анализе их с математической моделей и основных характеристик играет характер распределения температуры $T(x)$ и теплового потока $\Phi(x)$ вдоль теплопровода 2 (рис. 2.1) под воздействием контролируемого потока жидкости и газа.

Известно [65], что основные характеристики измерительных преобразователей на основе общей теории измерительных устройств могут быть проанализированы только на основе их математических моделей - законов распределения обобщенных сил и скоростей [65]. Матричные уравнения тепловых преобразователей [57,59] позволяют легко найти законы распределения температуры $T(x)$ (тепловых сил) и теплового потока Φ (тепловых скоростей) и проанализировать основные статические, динамические и другие характеристики рассматриваемых преобразователей. Также в работе [56] показано, что использование матричных уравнений тепловых четырехполюсников существенно упрощает анализ и расчет распределений $T(x)$ и $\Phi(x)$ в сложных теплопроводах тепловых систем (также тепловых преобразователей) путем типизации уравнений и вычисления их коэффициентов для наиболее распространенных типов теплопроводов преобразователей. Сложную тепловую систему преобразователей можно рассматривать путем расчленения их на более простые типы тепловых четырехполюсников и далее эффективно провести их анализ и синтез.

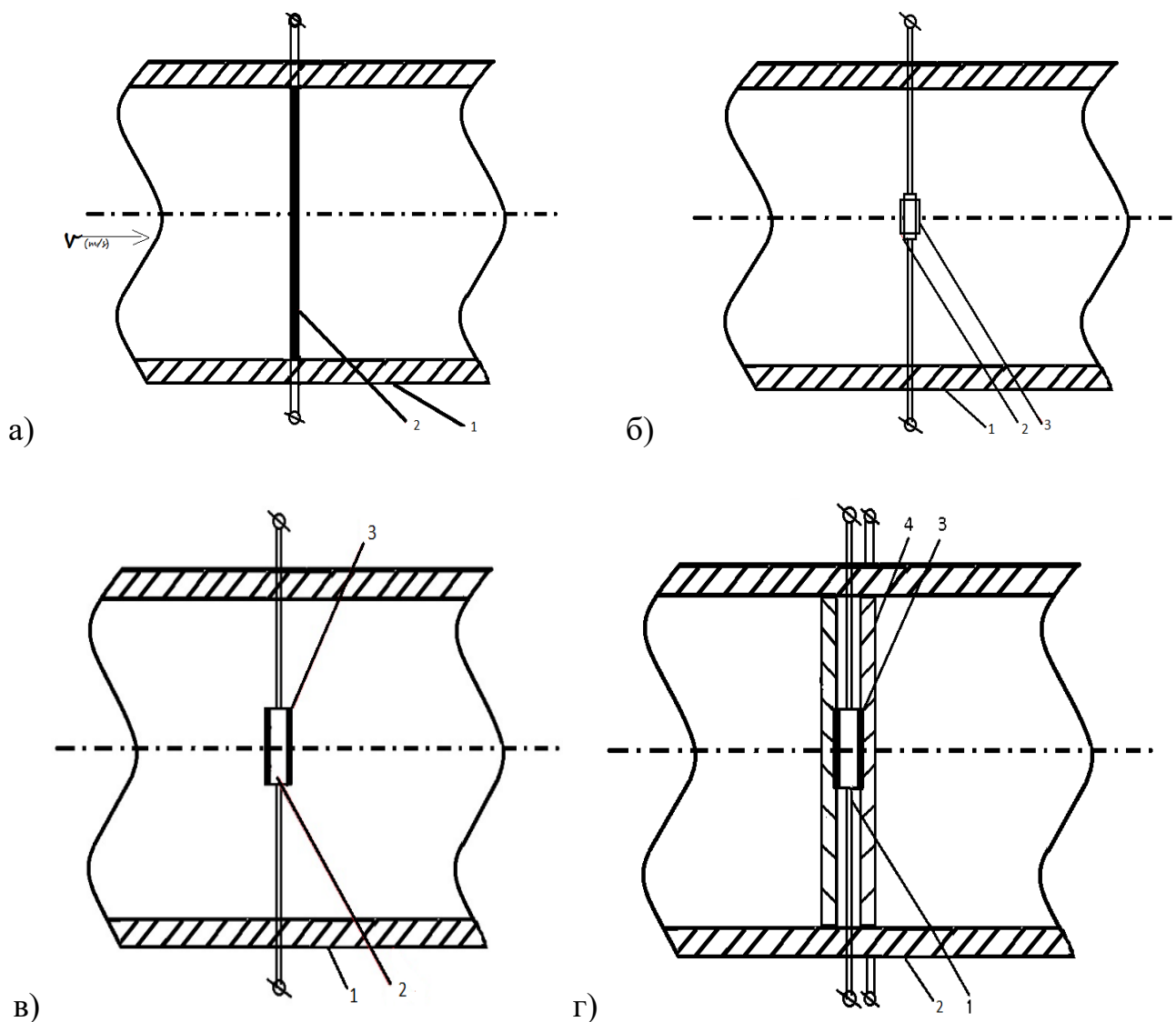


Рис. 2.2. Тепловые системы преобразователей расхода термоанемометрического типа:

1 - теплопровод; 2 - трубопровод преобразователя; 3 - распределенный источник тепла; 4 - наружный защитный кожух (гильза).

В пользу эффективности метода тепловых четырехполюсников [56] свидетельствует факт тесной математической связи операторного метода исследований с теорией четырехполюсников, что позволяет при исследовании различных конструкций тепловых преобразователей легко получать их передаточные функции.

Имеется большое число работ, посвященных математическим моделям тепловых преобразователей термоанемометрического типа [21,28,37,43,54,61,69].

Среди указанных работ в [37] наиболее полно рассмотрены вывод и анализ дифференциального уравнения распределения температуры $\Theta(x)$ вдоль протяженного цилиндрического теплопровода (тонкого металлического провода), который закреплен между двумя держателями. В работе [37] тепловые преобразователи термоанемометрического типа были разработаны в основном для контроля электрических величин: тока, напряжения, частоты и мощности в условиях стационарного теплообмена (свободная конвекция). Результаты данной работы представляют интерес при исследовании ТПТТ. Однако, ТПТТ предназначены для контроля параметров потока жидкости или газа в условиях вынужденной конвекции, кроме того, окончательные формулы статических и динамических моделей имеют очень сложный вид и затруднительно их использование в инженерной методике расхода и проектирования ТПТТ. Поэтому, математические модели, полученные в работе [37] необходимо развивать применительно к ТПТТ. Дифференциальное уравнение приведенное в [37] имеет вид

$$C_p \gamma F \frac{d\Theta}{d\tau} = \frac{d^2\Theta}{dx^2} - \left(\alpha \pi d - \frac{I^2 \rho_0 \beta}{F} \right) (\Theta - \Theta_0) + \frac{I^2 \rho}{F}, \quad (2.4)$$

где: C_p и λ соответственно удельные теплоемкость и коэффициент теплопроводности;

γ - плотность материала теплопровода;

Θ - температура окружающей среды;

F - площадь поперечного сечения теплопровода;

I - электрический ток

$\rho_0\beta$ - соответственно удельное электрическое сопротивление и температурный коэффициент сопротивления теплопровода;

α - коэффициент теплоотдачи.

В уравнении (2.4) член $\frac{I^2\rho_0\beta}{F}$ учитывает изменение электрического сопротивления металлической проволоки от изменения температуры Θ , что имеет значение при больших перегревах проволочных термоанемометров (до температуры 400 - 500°C).

В общем случае, при небольших нагревах теплопроводов собственным током особенно, при применении в ТПТТ полупроводниковых цилиндрических термометров сопротивления с дополнительными нагревательными элементами можно пренебречь членом $\frac{I^2\rho_0\beta}{F}$ и упростить дифференциальное уравнение приводя к виду

$$\frac{c_p p}{\lambda} \frac{d\Theta}{d\tau} = \frac{d^2\Theta}{dx^2} - \frac{\alpha p d}{\lambda F} \Theta + \frac{q(x)}{\lambda F} \quad (2.5)$$

где: $q(x) = \frac{I^2\rho_0\beta}{F}$ - удельное на единицу длины значение мощности источника тепла;

$\Theta_0 = \text{const.}$

Влияния члена $\frac{I^2\rho_0\beta}{F}$ необходимо учитывать при анализе источников погрешностей из-за нагрева термочувствительных элементов измерительным током в мостовой схеме.

Применяя к (2.5) преобразование Лапласа, получаем решения для изображения распределений температуры $\Theta(x, p)$ и теплового потока $\Phi(x, p)$ в виде

$$\Theta(x, p) = A_1 e^{\gamma(p)x} + B_1 e^{-\gamma(p)x} + \Theta_q(x, p) \quad (2.6)$$

$$\Phi(x, p) = -\frac{\gamma(p)}{z} A_1 e^{\gamma(p)x} + \frac{\gamma(p)}{z} B_1 e^{-\gamma(p)x} + \Phi_q(x, p) \quad (2.7)$$

где
$$\Theta(x,p) = \frac{zl^{\gamma(p)x}}{2\gamma(p)p} \int q(x)l^{-\gamma(p)x} dx + \frac{zl^{-\gamma(p)x}}{2\gamma(p)p} \int q(x)l^{\gamma(p)x} dx$$

$$\Phi_q(x,p) = \frac{\int q(x)dx}{p} + \frac{y(p)l^{\gamma(p)x}}{2p} \int [\int q(x)dx]l^{-\gamma(p)x} dx - \frac{\gamma(p)l^{-\gamma(p)x}}{2p} \int [\int q(x)dx]l^{\gamma(p)x} dx$$

С учетом граничных условий $\Theta(0,p)$ и $\Phi(0,p)$ при $x = 0$ для участка однородной тепловой цепи преобразователя длиной l записываем следующую систему уравнений в матричной форме через A - параметры [56]:

$$\begin{vmatrix} \Theta(0,p) \\ \Phi(0,p) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Theta_q(l,p)\{ch[\gamma(p)l] - 1\} + \frac{r}{\gamma(p)}\Phi_q(l,p)sh[\gamma(p)l] \\ \frac{\Theta_q(l,p)}{z(p)}\{sh[\gamma(p)l] + 1\} + \Phi_q(l,p)\{1 - ch[\gamma(p)l]\} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Theta(l,p) \\ \Phi(l,p) \end{vmatrix} \quad (2.8)$$

Здесь: $\Theta(0,p)$, $\Phi(0,p)$ и $\Theta(l,p)$, $\Phi(l,p)$ - изображения по Лапласу температуры Θ и теплового потока Φ соответственно;

p - оператор Лапласа;

$Z(p)$ - операторное волновое сопротивление тепловой линии; $y(p)$ - операторное изображение коэффициента распространения;

$\Theta_q(l,p)$, $\Phi_q(l,p)$ - соответственно источники температуры и теплового потока;

$A(l,p)$, $B(l,p)$, $C(l,p)$, $D(l,p)$ - параметры теплового четырехполюсника.

На основе (2.8) можно получить математическую модель преобразователей термоанемометрического типа, тепловые цепи которых состоят из отдельных участков тепловых цепей с источником тепла $q(x)$ или без него $q(x) = 0$.

Однако ниже с целью упрощения в основном при анализе математических моделей рассматриваются статические распределения температур $\Theta(x)$ вдоль теплопроводов термоанемометрических преобразователей, которые имеют существенное значение для анализа большинства метрологических характеристик, а динамические характеристики будут проанализированы в главе III при анализе основных характеристик термоанемометрических преобразователей.

2.2. Математическая модель однородного цилиндрического теплопровода без дополнительного источника тепла.

Физическая модель данного типа термоанемометрического преобразователя представляет собой тонкую металлическую проволоку, укрепленной между двумя держателями (рис. 2,2, а) в стенке трубы, причем температура держателей равна температуре окружающей среды.

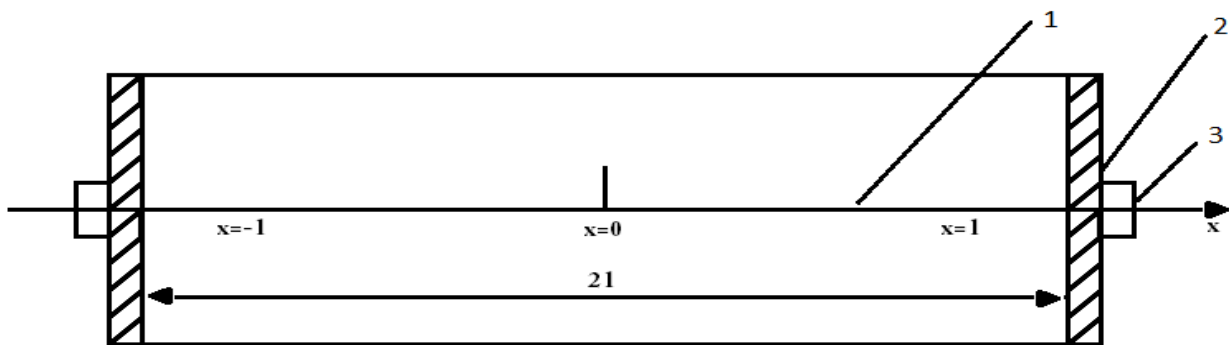


Рис. 2.3. Физическая модель однородного протяженного цилиндрического теплопровода без дополнительного источника тепла: 1 - теплопровод; 2 - выводные провода; 3 - стенка трубопровода.

С целью упрощения анализа тепловой цепи данного преобразователя и учитывая ее симметричность относительно середины при $x = 0$, а также считая, что при $x = 0$ проходит адиабатическая поверхность можно проанализировать только одну из половин теплопровода, а именно участок $0 < x < l$ и затем получить график распределения температуры $\theta(x)$ вдоль всего теплопровода. Можно также считать, что вдоль тонкой металлической проволоки с сопротивлением $R_{\text{ТН}}$ при прохождении измерительного тока $I_{\text{ТН}}$ выделяется удельная на единицу длины равномерная постоянная тепловая мощность

$$q = \frac{I_{\text{ТН}}^2 R_{\text{ТН}}}{2l} = \text{const} \quad (2.9)$$

Матричное уравнение (2.8.) при постоянстве теплового потока вдоль теплопровода ($q = \text{const}$), что имеет место при конструкциях

термоанемометрических преобразователей данного типа имеет вид:

$$\begin{vmatrix} \Theta(0, p) \\ \Phi(0, p) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{q}{p(Cp\rho Fp + \alpha\pi d)} \{ch[\gamma(p)l] - 1\} \\ \frac{\gamma(p)q \cdot \lambda F}{p\alpha\pi d} sh[\gamma(p)l] \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} A(l, p) & B(l, p) \\ C(l, p) & D(l, p) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Theta(l, p) \\ \Phi(l, p) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Из (2.6) для температуры в центре теплопровода ($x = 0$) $\Theta(0, p)$ получаем после преобразований выражение

$$\Theta(0, p) = \frac{\Theta(l, p) - \frac{q}{p(Cp\rho Fp + \alpha\pi d)} \{1 - ch[\gamma(p)l]\}}{ch[\gamma(p)l]} \quad (2.11)$$

Это выражение можно использовать для анализа статических и динамических характеристик данного типа термоанемометрических преобразователей (рис. 2.3.), например, с термоэлектрическим термочувствительным элементом в центре теплопровод[63].

Распределение температуры $\Theta(x, p)$ вдоль теплопровода 1 находится по формуле

$$\Theta(x, p) = \Theta(l, p) ch[\gamma(p)(l - x)] + \frac{q\{1 - ch[\gamma(p)(l - x)]\}}{p(Cp\rho Fp + \alpha\pi d)} \quad (2.12)$$

На рис. 2.4 приведены графики распределения температуры $\Theta(x)$ вдоль тонкой металлической нити, полученные на основе выражения (2.12)

при различных скоростях потоков воздуха: $V_1 = 0.5$ м/с; $V_2 = 1.0$ м/с; $V_3 = 1.5$ м/с;

Анализ графиков на рис.2.4 показывает, что для относительно коротких металлических нитей среднее значение температуры нити $\Theta_1(x)$ на 8 -10 % меньше максимального значения $\Theta_1(0)$.

Данный тип преобразователей как показано в главе 1 используется на практике для контроля скоростей открытых потоков воздуха и других газов.

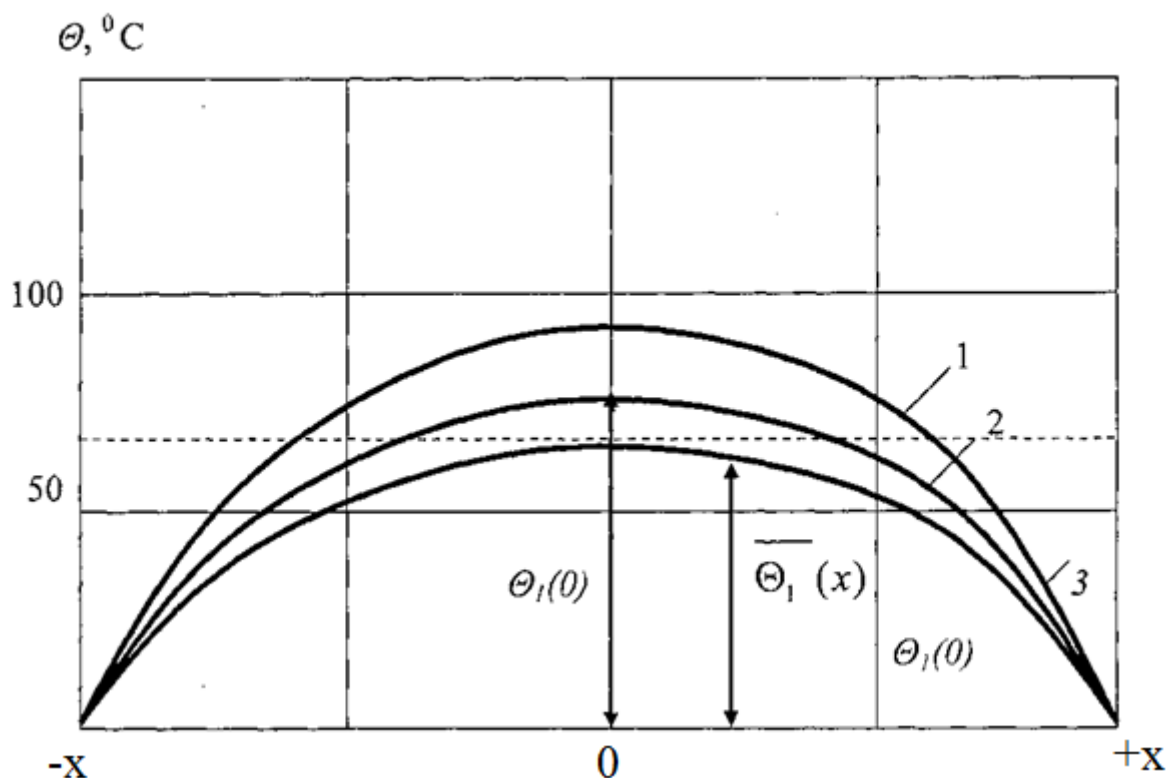


Рис. 2.4. Графики распределения температуры $\Theta(x)$ вдоль тонкой металлической нити преобразователя термоанемометрического типа.

Применение данного типа преобразователя в конструкции трубчатого ТПТТ ограничено из-за невысокой надежности. Кроме того, для повышения чувствительности преобразователя на практике через тонкий металлический провод (теплопровод) пропускают достаточно большой электрический ток, что обеспечивает температуру $\Theta(x)$ до 400 - 500 °С, что также снижает надежность преобразователя.

2.3. Математическая модель неоднородного протяженного цилиндрического теплопровода без дополнительного источника тепла.

Физическая модель данного типа термоанемометрического преобразователя представляет собой термосопротивление (полупроводниковое) 1 цилиндрической формы с медными выводными проводниками 2, укрепленными между двумя держателями 3 (рис. 2.2, б), (стенки трубы), причем температура держателей равна температуре окружающей среды. Неоднородный цилиндрический теплопровод состоит из двух участков (как было указано выше рассматривается только одна половина симметричного теплопровода): участок длиной l_1 и диаметром d_1 (тело термометра сопротивления 1) и участок длиной l_2 и диаметром d_2 (выводные провода 2). На основании уравнения (2.8.) для участка // можно написать уравнение распределения температуры $\theta_1(x)$

$$\begin{aligned} \theta_1(x) &= \theta_1(0) \operatorname{ch} \left[\sqrt{\frac{\alpha \pi d_{\text{ТЧЭ}}}{\lambda F_{\text{ТЧЭ}}}} x \right] + \frac{I_{\text{ТЧЭ}}^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{1_{\text{ТЧЭ}} \alpha \pi d_{\text{ТЧЭ}}} \left[1 - \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{\alpha \pi d}{\lambda F}} x \right) \right] = \\ &= \left[\theta_1(0) - \frac{I^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{\alpha \pi d_{\text{ТЧЭ}} l_{\text{ТЧЭ}}} \right] \operatorname{ch} \left[\sqrt{\frac{\alpha \pi d}{\lambda F}} x \right] + \frac{I_{\text{ТЧЭ}}^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{1_{\text{ТЧЭ}} \alpha \pi d_{\text{ТЧЭ}}} \end{aligned} \quad (2.13)$$

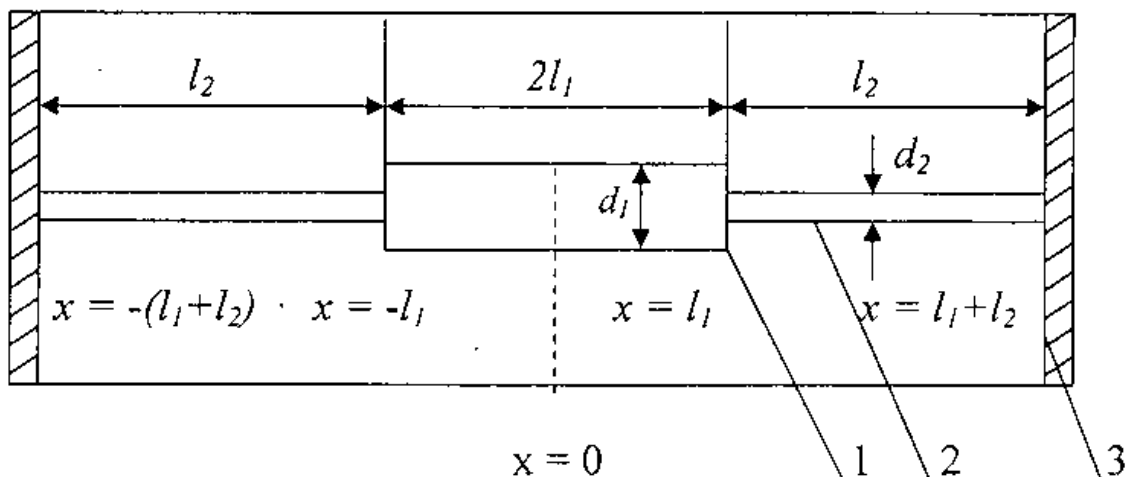


Рис.2.5. Физическая модель неоднородного цилиндрического теплопровода без дополнительного источника тепла.

Вдоль участка l_2 распределение температуры определяется выражением

$$\Theta_2(x) = \Theta_2(l_1) \operatorname{ch} \left[\sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_2 F_2}} x \right] - \varphi_2(l_1) \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 F_2 \alpha_2 \pi d_2}} \cdot \operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_2 F_2}} x \right] = \Theta_2(l_1) l^{-\sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_2 F_2}} x} \quad (2.14)$$

При $x = l_1$ температуры между участками l_1 и l_2 равны:

$$\Theta_1(l_1) = \Theta_2(l_1) \quad (2.15)$$

и равны производные температур $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$.

$$\left. \frac{d\Theta_1(x)}{dx} \right|_{x=l_1} = \left. \frac{d\Theta_2(x)}{dx} \right|_{x=l_1} \quad (2.16)$$

С учетом вышесказанного находятся значения температур $\Theta_1(0)$; $\Theta_1(x)$; $\Theta_2(l)$; $\Theta_2(x)$;

$$\Theta_1(0) = \frac{l_{\text{ТЧЭ}}^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{l_{\text{ТЧЭ}} \alpha_1 \pi d_1} \left\{ 1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \left[\sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} l_1 + \sqrt{\frac{\alpha_1 d_1 \lambda_2 F_2}{\alpha_2 d_2 \lambda_1 F_1}} \operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} l_1 \right] \right]} \right\} \quad (2.17)$$

$$\Theta_1(x) = \frac{l_{\text{ТЧЭ}}^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{l_{\text{ТЧЭ}} \alpha_1 \pi d_1} \left\{ 1 - \frac{\operatorname{ch} \left[\sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} x \right]}{\operatorname{ch} \left[\sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} l_1 + \sqrt{\frac{\alpha_1 d_1 \lambda_2 F_2}{\alpha_2 d_2 \lambda_1 F_1}} \operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} l_1 \right] \right]} \right\} \quad (2.18)$$

$$\Theta_2(l) = \sqrt{\frac{\alpha_1 d_1 \lambda_2 F_2}{\alpha_2 d_2 \lambda_1 F_1}} \left[\frac{l_{\text{ТЧЭ}}^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{l_{\text{ТЧЭ}} \alpha_1 \pi d_1} - \Theta_1(0) \right] \operatorname{sh} \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_2 F_2}} l_1 e^{\sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_2 F_2}} l} \quad (2.19)$$

$$\Theta_2(x) = \sqrt{\frac{\alpha_1 d_1 \lambda_2 F_2}{\alpha_2 d_2 \lambda_1 F_1}} \left[\frac{l_{\text{ТЧЭ}}^2 R_{\text{ТЧЭ}}}{l_{\text{ТЧЭ}} \alpha_1 \pi d_1} - \Theta_1(0) \right] \operatorname{sh} \sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} l_1 e^{-(x-l_1) \sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_2}{\lambda_2 F_2}}} \quad (2.20)$$

Для определения распределения $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$ вдоль теплопровода были найдены значения коэффициентов теплоотдачи α из критериальных уравнений приведенных в работах [42, 58, 70, 71].

На основании [42] теплоотдача тонкого цилиндрического теплопровода в поперечном потоке воздуха при значениях критерия Рейнольдса (Re).

$$Re = 10 - 1000 \quad (2.21)$$

описывается следующим критериальным уравнением

$$Nu = 0,52 Re^{0,47}, \quad (2.22)$$

где Nu - критерий Нуссельта ($Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$)

d - диаметр провода;

λ - коэффициент теплопроводности теплопровода;

$$Re = \frac{Vd}{\nu}, \quad (2.23)$$

где: V – скорость потока газа;

ν - коэффициент кинематической вязкости газа.

При известном Nu определяется α

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} \quad (2.24)$$

На рис. 2.6. приведены графики распределения $\Theta(x)$ вдоль теплопровода данного преобразователя при различных скоростях потока воздуха $V_1 = 1,0$ м/с; $V_2 = 2,0$ м/с; $V_3 = 3,0$ м/с; $V_4 = 4,0$ м/с;

В данном типе преобразователя нагрев теплопровода осуществляется собственным током, что не обеспечивает достаточную чувствительность. Однако, увеличение электрического тока $I_{ТЧЭ}$ с целью повышения чувствительности может

привести к перегреву теплопровода и снижению надежности. Более целесообразным является применение дополнительного нагревательного элемента, что реализовано в следующей конструкции преобразователя термоанемометрического типа.

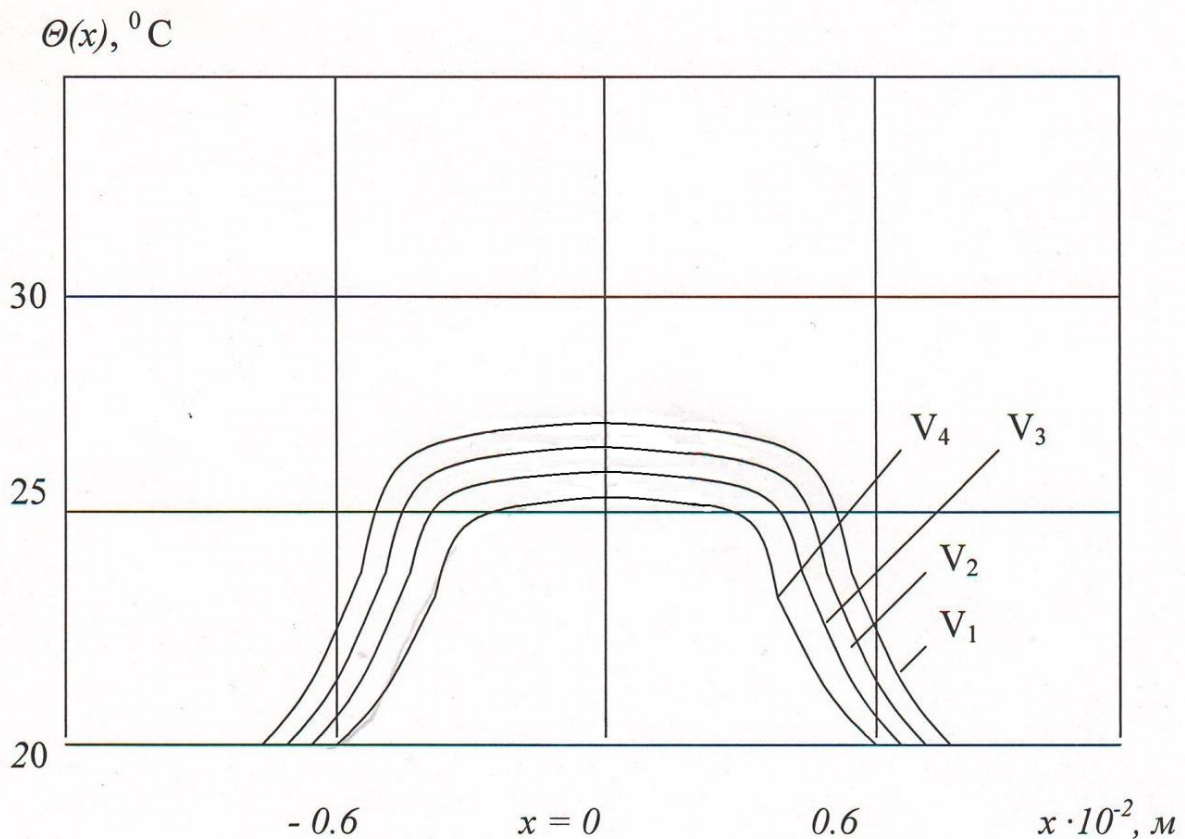


Рис.2.6. Графики распределения температуры $\theta(x)$ вдоль неоднородного' цилиндрического теплопровода без дополнительного источника тепла при скоростях потока воздуха $V_1 = 1,0$ м/с; $V_2 = 2,0$ м/с; $V_3 = 3,0$ м/с; $V_4 = 4,0$ м/с;

2.4 Математическая модель неоднородного цилиндрического теплопровода с дополнительным источником тепла.

Физическая модель данного типа преобразователя представляет собой полупроводниковое термосопротивление 1, на цилиндрическое тело которого намотана обмотка нагревательного элемента 2 и укреплено с помощью выводных проводов 3 на держателях 4 (стенки трубы), температура которых равна температуре окружающей среды.

Неоднородный цилиндрический теплопровод с дополнительным источником тепла по физической и математической модели аналогичен теплопроводу на рис. 2.5. Основное отличие состоит в введении в конструкцию термоанемометрического преобразователя дополнительного источника тепла и уравнение распределения температуры $\Theta_1(x)$ запишется в

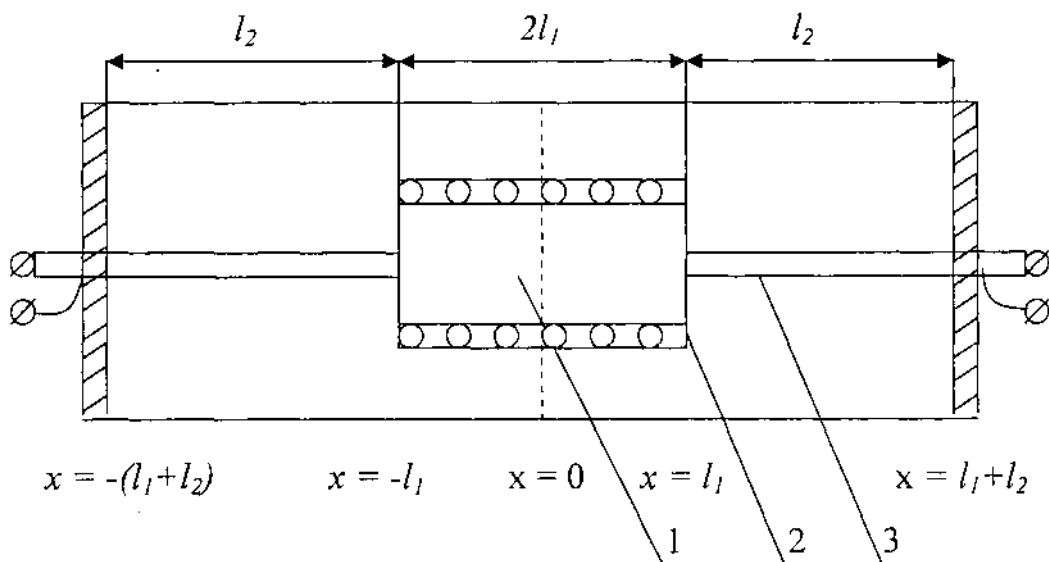


Рис. 2.7. Физическая модель неоднородного цилиндрического теплопровода термоанемометрического преобразователя с дополнительным источником тепла: 1 - тело термометра сопротивления; 2 - нагревательный элемент; 3 - выводные провода.

следующем виде

$$\Theta_1(x) = \left[\Theta_1(0) - \frac{(I_{ТЧЭ}^2 R_{ТЧЭ} + I_{НЭ}^2 R_{НЭ})}{\alpha_1 \pi d_{НЭ} l_{ТЧЭ}} \right] ch \left[\sqrt{\frac{\alpha_1 \pi d_1}{\lambda_1 F_1}} + \frac{I_{ТЧЭ}^2 R_{ТЧЭ} + I_{НЭ}^2 R_{НЭ}}{\alpha_1 \pi d_{НЭ} l_{ТЧЭ}} \right] \quad (2.25)$$

и распределение температуры $\Theta_1(x)$ описывается аналогичной формулой

$$\Theta_1(x) = \Theta_1(l_1) e^{-\sqrt{\frac{\alpha_2 \pi d_{НЭ}}{\lambda_2 F_2}} x} \quad (2.26)$$

По аналогичным формулам (2.25) - (2.26) находятся значения температур $\Theta_1(0)$ и $\Theta_2(l)$. Нагревательные элементы выполняются как правило из микропровода (нихром, манганин) диаметром не более 0.1 мм, а диаметр полупроводникового ТЧЭ не менее 1 мм и поэтому за определяющий размер диаметра d , берется диаметр ТЧЭ. Теплопроводность полупроводниковых ТЧЭ по сравнению с металлическими нагревательными элементами существенно ниже (порядка $\lambda = 1,36$ Вт / мград) и поэтому за определяющее значение λ_1 берется теплопроводность ТЧЭ.

На рис.2.8. приводится график распределения $\Theta(x)$ вдоль неоднородного цилиндрического теплопровода с дополнительным источником тепла.

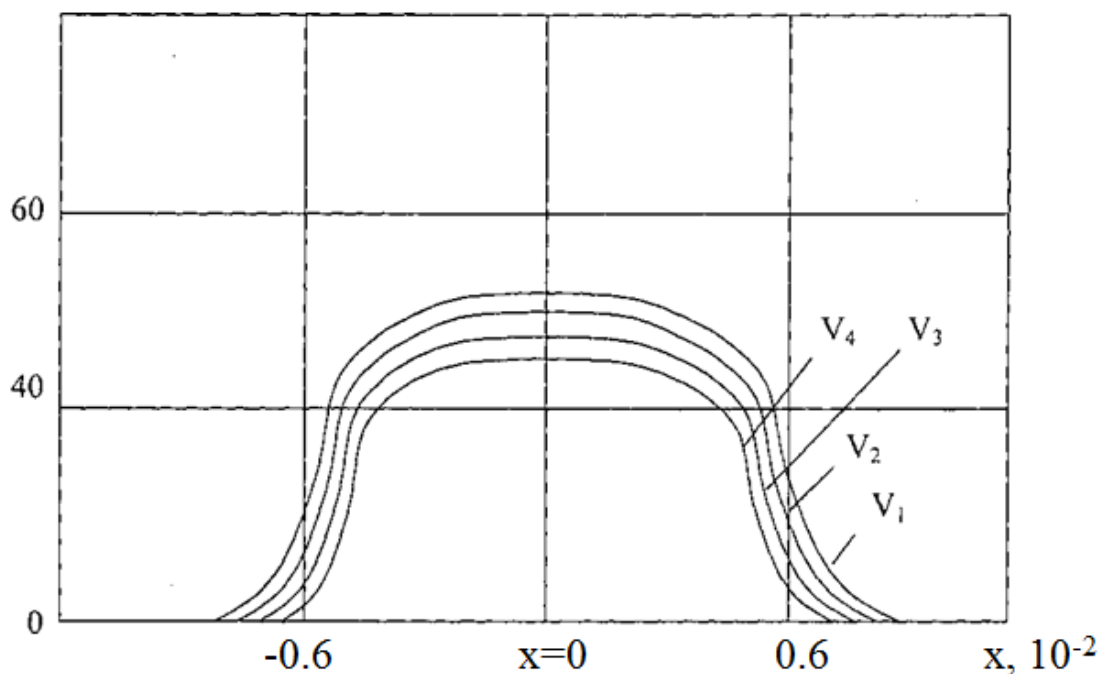


Рис. 2.8. Графики распределения температуры $\Theta(x)$ вдоль неоднородного цилиндрического теплопровода с дополнительным источником тепла при скоростях потока воздуха $V_1 = 1,0$ м/с; $V_2 = 2,0$ м/с; $V_3 = 3,0$ м/с; $V_4 = 4,0$ м/с;

2.5 Математическая модель сложного неоднородного цилиндрического теплопровода с дополнительным источником тепла.

Физическая модель данного типа термоанемометрического преобразователя представляет собой полупроводниковое термосопротивление 1, на

цилиндрическую поверхность которого намотана обмотка нагревательного элемента 2 и помещено оно внутрь защитной трубки (капсулы) 5, которое укреплено на торцах в стенке трубопровода 6 потока.

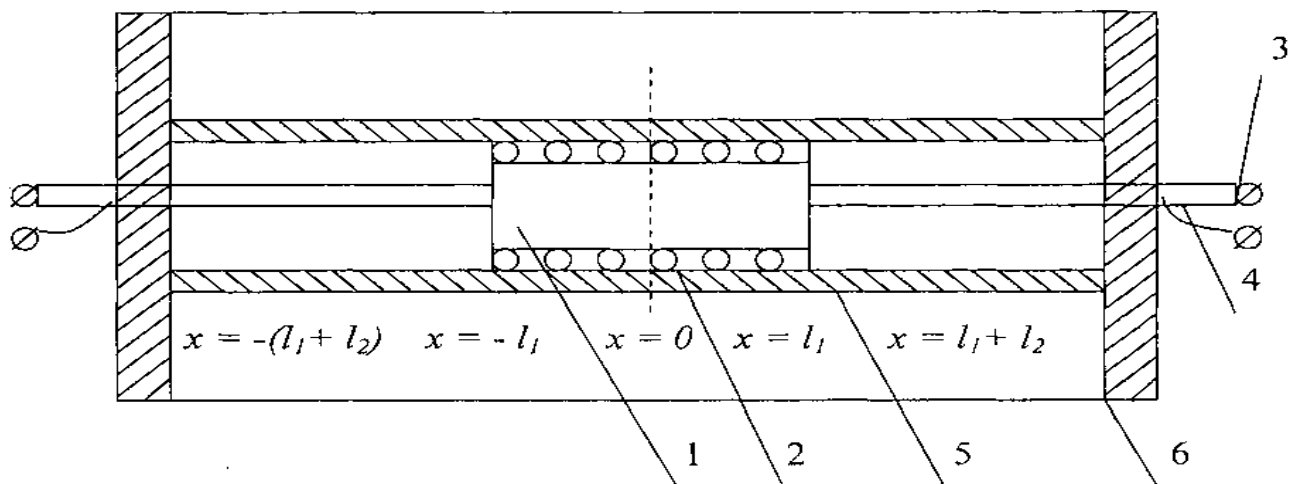


Рис. 2.9. Физическая модель сложного многослойного неоднородного теплопровода с дополнительным источником тепла.

На основании уравнения (2.26) для участка $0 \leq x \leq l_1$ можно записать выражение для определения распределения температуры $\Theta_1(x)$

$$\Theta_1(x) = \Theta_1(x=0)ch\gamma x + \frac{q}{\alpha\pi d}(1 - ch\gamma x) = \left[\Theta_1(0) - \frac{q}{\alpha\pi d}\right]ch\gamma x - \frac{q}{\alpha\pi d} \quad (2.27)$$

вдоль участка $l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$, распределение $\Theta_2(x)$ определяется из выражения

$$\Theta_2(x) = \Theta_2(l_1)ch\gamma_2 x - z_2 \phi_2(l_1)sh\gamma_2 x = \Theta(l_1)e^{-\gamma_2 x} \quad (2.28)$$

Далее проведем стыковку выражений (2.27) и (2.28) в точке $x = l_1$, где равны как по температуре

$$\Theta_1(l_1) = \Theta_2(l_1) \quad (2.29)$$

так и их производные

$$\left.\frac{d\Theta_1(x)}{dx}\right|_{x=l_1} = \left.\frac{d\Theta_2(x)}{dx}\right|_{x=l_1} \quad (2.30)$$

На основании выше изложенных (2.27) - (2.30) находятся

$$\theta_2(l) = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left[\frac{q}{\alpha \pi d} \right] \text{sh} \gamma_2 l_2 e^{\gamma_2 l_2}; \quad (2.31)$$

$$\theta_2(x) = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left[\frac{q}{\alpha \pi d} \right] \text{sh} \gamma_1 l_1 e^{-(x-l_1)\gamma_2}; \quad (2.32)$$

$$\theta_2(0) = \frac{q}{\alpha \pi d} \left[1 - \frac{1}{\text{ch} \gamma_1 l_1 + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \text{sh} \gamma_1 l_1} \right]; \quad (2.33)$$

$$\theta_2(x) = \frac{q}{\alpha \pi d} \left[1 - \frac{\text{ch} \gamma_1 x}{\text{ch} \gamma_1 l_1 + \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \text{sh} \gamma_1 l_1} \right]; \quad (2.34)$$

На основании выражений (2.25) – (2,28) построены кривые распределения $\theta(x)$ вдоль трубки теплопровода.

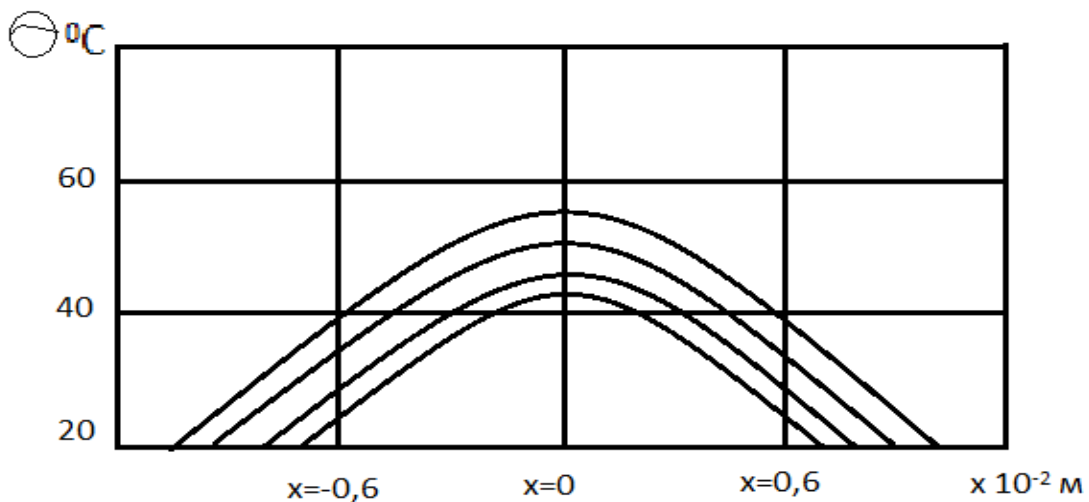


Рис. 2.10. Графики распределения температуры $\theta(x)$ в сложном цилиндрическом теплопроводе с дополнительным источником тепла при скоростях потоков воздуха $V_1=1,0$ м/с; $V_2=2,0$ м/с; $V_3=3,0$ м/с; $V_4=4,0$ м/с;

Для получения исходных данных при разработке конструкций ТПТТ и установления соответствия математических моделей реальным характеристикам ТПТТ были проведены экспериментальные исследования конструкции ТПТТ.

Экспериментальные исследования были сведены к исследованию зависимости электрического сопротивления полупроводниковых цилиндрических термосопротивлений типа ММТ-1 от различных скоростей потока воздуха v с последующей обработкой этих данных в виде зависимости средних значений температур термосопротивлений \bar{T} от скорости потока воздуха V и сравнения их с расчетными значениями температур на основе математических моделей.

Экспериментальные исследования образцов преобразователей были проведены на установке, схема которой представлена на рис. 2.11.

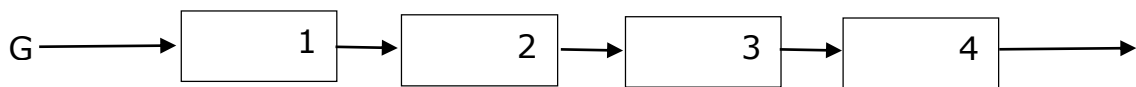


Рис. 2.11. Схема экспериментальной установки для исследования тепловых преобразователей термоанемометрического типа: 1 - тепловой преобразователь термоанемометрического типа; 2 - ротаметр типа РС - 3А; 3 - газовый счетчик ГСБ - 400; 4 - побудитель расхода (насос).

На рис. 2.12. приведена экспериментальная конструкция термоанемометрического преобразователя на основе стеклянной трубки диаметром $d = 8 \cdot 10^{-3}$ м с двумя полупроводниковыми сопротивлениями типа ММТ - 1 (диаметр $d_T = 2 \cdot 10^{-3}$ и длиной $l_T = 12 \cdot 10^{-3}$ м).

Полупроводниковые термосопротивление 3 было снабжено нагревательным элементом из манганиновой проволоки сопротивлением $R_{НЭ} = 55,6$ Ом.

Результаты расчетных и экспериментальных исследований приведены на рис. 2.13. График 1 соответствовал зависимости сопротивления R_T термосопротивление 2 от скорости V . Эта характеристика получена для R_T без нагревательного элемента. Графики 2, 3 и 4 соответствуют зависимости сопротивления R_{T2} термосопротивления 3 с нагревательным элементом 4 от скорости потока воздуха V при токах через нагревательный элемент соответственно: 2 - $I_{НЭ} = 0,045$ А; 3 - $I_{НЭ} = 0,07$ А; 4 - $I_{НЭ} = 0,1$ А.

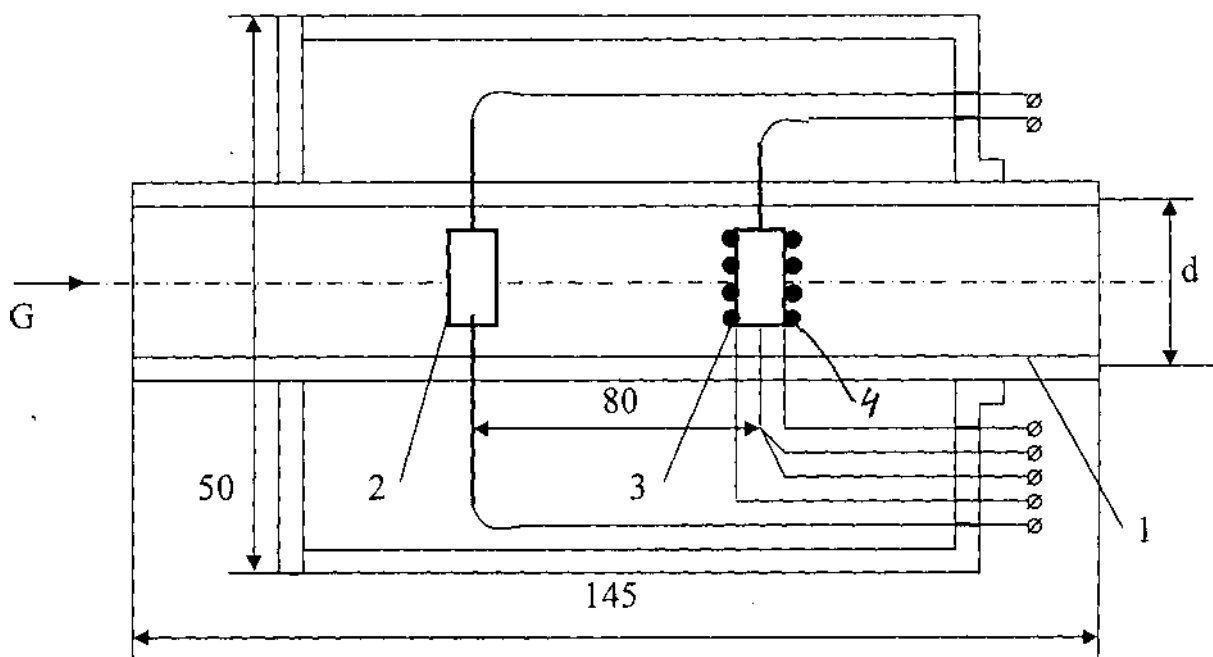


Рис. 2.12. Конструкция термоанемометрического преобразователя параметров потока воздуха:

1 - стеклянная трубка; 2 - полупроводниковое термосопротивление типа ММТ-1 без НЭ; 3 – полупроводниковое термосопротивление ММТ-1 с НЭ ($R_{НЭ} = 55,6$ Ом) $R_{t_1} = 21,8$ Ком, $R_{t_2} = 22,1$ Ком, при $T = 20$ °С); 4 - нагревательный элемент из манганиновой проволоки.

Сравнения расчетных и экспериментальных данных (линии - расчетные данные, а экспериментальные данные - точки) показывает их хорошее согласование, что подтверждает правильность методики составления математических моделей и методики расчета. Ниже на рис. 2.14 приводятся сравнительные графики зависимости разности средней температуры $\bar{T}(x)$ и температуры потока воздуха T_0 для термосопротивления $R_{Т2} при I_{НЭ} = 0,07$ А.

При расчете зависимостей $R_T = f(v)$ (рис. 2.13) и $\Delta T = \bar{T}(x) - T_0$ (рис. 2.14) учитывалось то обстоятельство, что в данных конструкциях полупроводниковых термосопротивлений с НЭ тепло выделенное в НЭ не может быть полностью воспринято термосопротивлением и часть тепла неизбежно теряется (не идеален тепловой контакт с НЭ, потери тепла излучением и по соединительным проводам). Поэтому как это сделано в работе [72] мы ввели коэффициент тепловой связи $K_{тс}$ определив его значение путем

сравнения степени нагрева термосопротивления без НЭ и с НЭ на основе расчетных и экспериментальных данных. В работе [72] указано, что $K_{тс}$ изменяется в пределах 0,5 - 0,97. В наших исследованиях значение $K_{тс} = 0,49$ и учет теплопотерь на основе $K_{тс}$ позволило получить хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных (расхождение не превышает 8-10%).

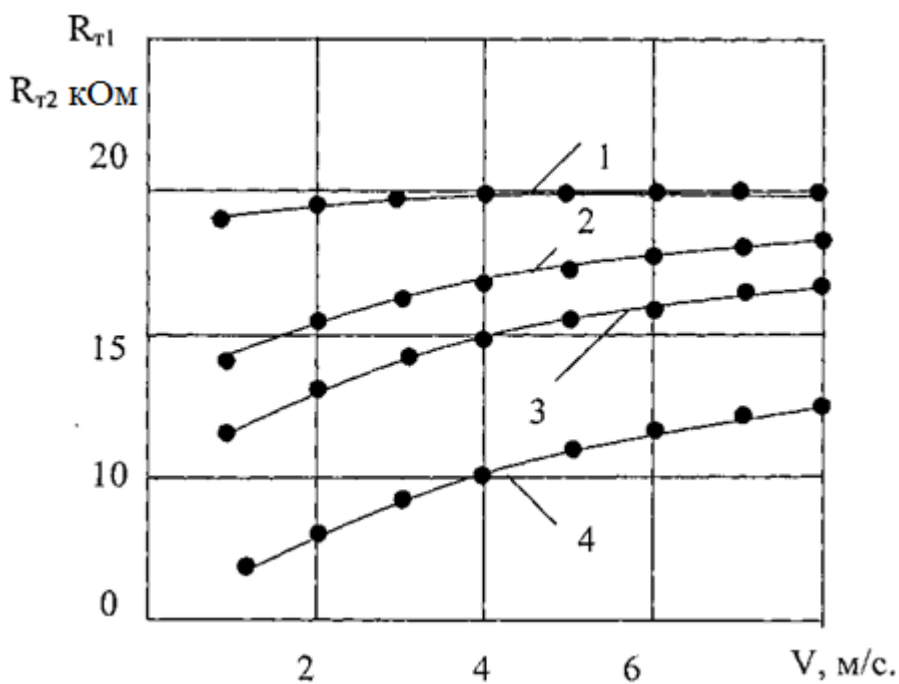


Рис. 2.13. Графики зависимостей сопротивлений R_{T1} и R_{T2} (термосопротивлений 2 и 3) от скорости потока воздуха V .

Анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований показывает, что наименьшая чувствительность имеет место у ТПТТ без НЭ, при этом для увеличения чувствительности данных ТПТТ необходимо увеличить ток через термосопротивление в мостовой измерительной схеме, что приведет к снижению надежности ТПТТ. Лучшие характеристики имеют ТПТТ с НЭ и поэтому данные ТПТТ выбираются для дальнейших исследований и разработок.

$$\Delta T = T(x) - T_0, ^\circ\text{C}$$

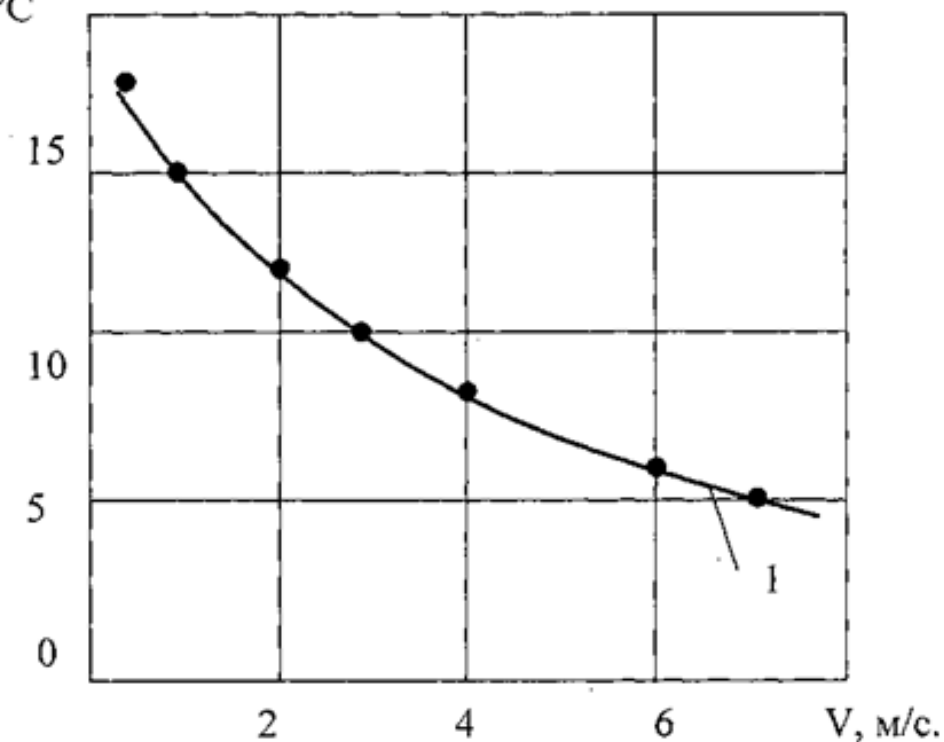


Рис. 2.14. Графики зависимости разности температур ΔT от скорости потока воздуха V : 1 - расчетные данные (линии); 2 - экспериментальные данные (точки).

Глава III. Основные характеристики преобразователей термоанемометрического типа.

3.1. Общие вопросы основных характеристик тепловых преобразователей термоанемометрического типа.

К основным характеристикам ТПТТ относятся статические, динамические, чувствительность, надежность и погрешность.

На основании функциональной схемы (рис. 2.1.) легко строится графовая модель ТПТТ, которая имеет вид представленный на рис. 3.1.

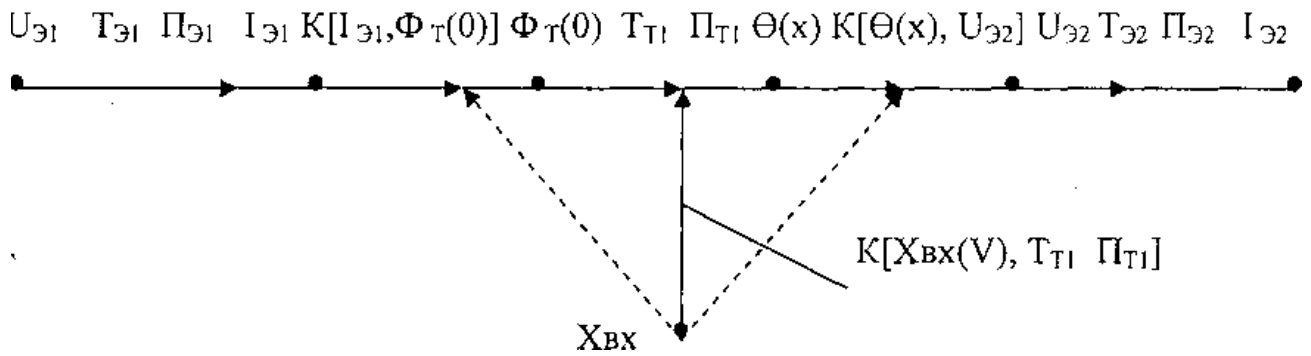


Рис. 3.1. Графовая модель ТПТТ.

Цепь питания НЭ представлена подграфом $U_{Э1}I_{Э1}$ (электрические напряжения и ток), для которой схемная функция $T_{Э1}$ с параметром $П_{Э1}$ отображает структуру схемы питания. В цепи $I_{Э1}, \Phi_T(0)$ ток $I_{Э1}$ преобразуется в тепловой поток от НЭ $\Phi_T(0)$, что отображается коэффициентом межцепной связи $K[I_{Э1}, \Phi_T(0)]$. В теплопроводе ТПТТ тепловой поток $\Phi_T(0)$ распространяется вдоль координаты X и в результате теплообмена с потоком газа определяет распределение температуры вдоль теплопровода $\Theta(x)$. Далее с помощью тех или иных термочувствительных элементов распределение $\Theta(x)$ преобразуется в выходной электрический сигнал $U_{Э2}$ или ток $I_{Э2}$. На основании графовой модели имеется возможность проанализировать в общем виде статическую характеристику любого типа ТПТТ и далее конкретизировать ее с учетом типа термочувствительного элемента и измерительной схемы.

На основе графовой модели (рис. 3.1) обобщенную статическую характеристику можно представить в виде:

$$U_{ВЫХ} = U_{Э1} \cdot T_{Э1} \cdot П_{Э1} \cdot K[I_{Э1}, \Phi_T(0)] \cdot T_{Т1} \cdot П_{Т1} \cdot K[\Theta(x), U_{Э2}] \cdot K[X_{ВХ}(V), U_{Э2} \cdot T_{Т1} \cdot П_{Т1}] \cdot X_{ВХ} \quad (3.1)$$

Учитывая, что НЭ питается от электрического тока $I_{Э1}$ можно записать

$$U_{Э1} \cdot T_{Э1} \cdot П_{Э1} \cdot K[I_{Э1}, \Phi_T(0)] = I_{НЭ}^2 R_{НЭ} = \Phi_T(0) \quad (3.2)$$

В ТПТТ как правило $R_{RH} = \text{const}$ и стабильным является выделяемый тепловой поток $\Phi_T(0)$. Далее необходимо будет определить коэффициент

межцепной связи $K[\Theta(x) U_{Э2}]$, который отражает зависимость выходного напряжения $U_{ВЫХ}$ от распределения температуры $\Theta(x)$, что можно будет сделать на основе соответствующей математической модели, конкретного термосопротивления и мостовой схемы.

Для получения статической характеристики межцепной коэффициент для газов и, наконец, необходимо будет определить коэффициент межцепной связи между контролируемой скоростью потока газа V и выходным напряжением $U_{Э2}$.

Таким образом, статическая характеристика ТПТТ определяется на основе исследования математических моделей, полученных в главе II, а также на основе характеристик термочувствительных элементов и измерительных схем.

В рассматриваемых ТПТТ, как было показано выше, в качестве ТЧЭ используются полупроводниковые термометры сопротивления, которые включаются в делительные или мостовые измерительные схемы, при этом для получения стандартного выходного сигнала в измеряемом диапазоне в виде электрического тока

от 0 до 5 мА или в виде электрического напряжения от 0 до 2 В выходы мостовых схем подключаются ко входам операционных усилителей (ОУ).

Для делительной измерительной схемы (рис.3.2, а) выходное

$U_{ВЫХ}$ равно

$$U_{ВЫХ} = U_M \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.3)$$

При изменении $\Theta(x)$ изменяется сопротивление ТЧЭ R_1 на величину $R_1 E_1$ станет равным $R_1(1 + E_1)$

$$U_{ВЫХ} = U_M \frac{R_1(1 + E_1)}{R_1(1 + E_1) + R_2} - U_M \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.4)$$

или

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{K}{K+1} \frac{E_1}{(K+1+KE_1)} \quad (3.5)$$

Для мостовой схемы включения ТЧЭ R_1 имеем

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3.6)$$

При изменении $\theta(x)$ изменение R_1 приводит к

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{R_1(1+E_1)R_4 - R_2 R_3}{[R_1(1+E_1) + R_2](R_3 + R_4)} \quad (3.7)$$

или (3.9) преобразуем к виду

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{KE_1}{(K+1)(K+1+KE_1)} \quad (3.8)$$

где $K = R_1 / R_2 = R_3 / R_4$ - коэффициент симметрии делительной или мостовой схемы.

В ряде конструкций ТПТТ сопротивления ТЧЭ в относительном значении изменяются незначительно ($E \ll 1$) и выражение статической характеристики можно записать в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{K}{(K+1)^2} E_1 \quad (3.9)$$

Эта формула пригодна для ТПТТ контролирующего как скорость, так и для измерения температуры потока (при отключенном НЭ). При контроле направлений потока в плечи делительных и мостовых схем включаются два ТПТТ, у которых в зависимости от напряжения потока газа или жидкости будут разные условия теплообмена, а следовательно и разные распределения $\Theta_1(x)$ и $\Theta_2(x)$. В зависимости от направления потока одно ТЧЭ, например R_1 будет увеличиваться, а R_2 будет уменьшаться и $U_{\text{ВЫХ}}$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{М}} \frac{K}{(K+1)^2} \frac{(E_1 + E_2)}{(K+1+KE_1 - E_2)} \quad (3.10)$$

При значениях $K \approx 1$, $E_1 \ll 1$, $E_2 \ll 1$ запишем

$$U_{\text{вых}} = U_M 0,25 (E_1 + E_2) \quad (3.11)$$

Может быть также использована мостовая схема с четырьмя термочувствительными элементами, что существенно увеличивает чувствительность ТПТТ

$$U_{\text{вых}} = U_M \frac{K}{(K+1)^2} (E_1 + E_2 + E_3 + E_4) \quad (3.12)$$

Ниже на основании вышеизложенного анализируются основные характеристики ТПТТ. Выше в главах II и III было показано, что ТПТТ на основе тонкой металлической проволоки достаточно хорошо исследованы и разработаны. ТПТТ на основе полупроводникового термосопротивления без специального НЭ не достаточно применяются из-за большой перегрузки термосопротивления собственным током нагрева (что уменьшает надежность срок эксплуатации и увеличивает погрешность данных преобразователей). Использование в ТПТТ дополнительного НЭ разгружает полупроводниковое термосопротивление от перегрузки измерительным током и повышает чувствительность и надежность. Именно типы ТПТ с НЭ получили распространение в многофункциональных ТПТ [43,54,55,61]. Как было показано выше полупроводниковые термосопротивления без НЭ используется в конструкциях многофункциональных ТПТ только для контроля температуры потока. Ниже исследуются статические характеристики ТПТТ на основе полупроводниковых термосопротивлений, которые соответствуют исследованным в главе II тепловым системам, представленных на рис. 2.2, б, в, г.

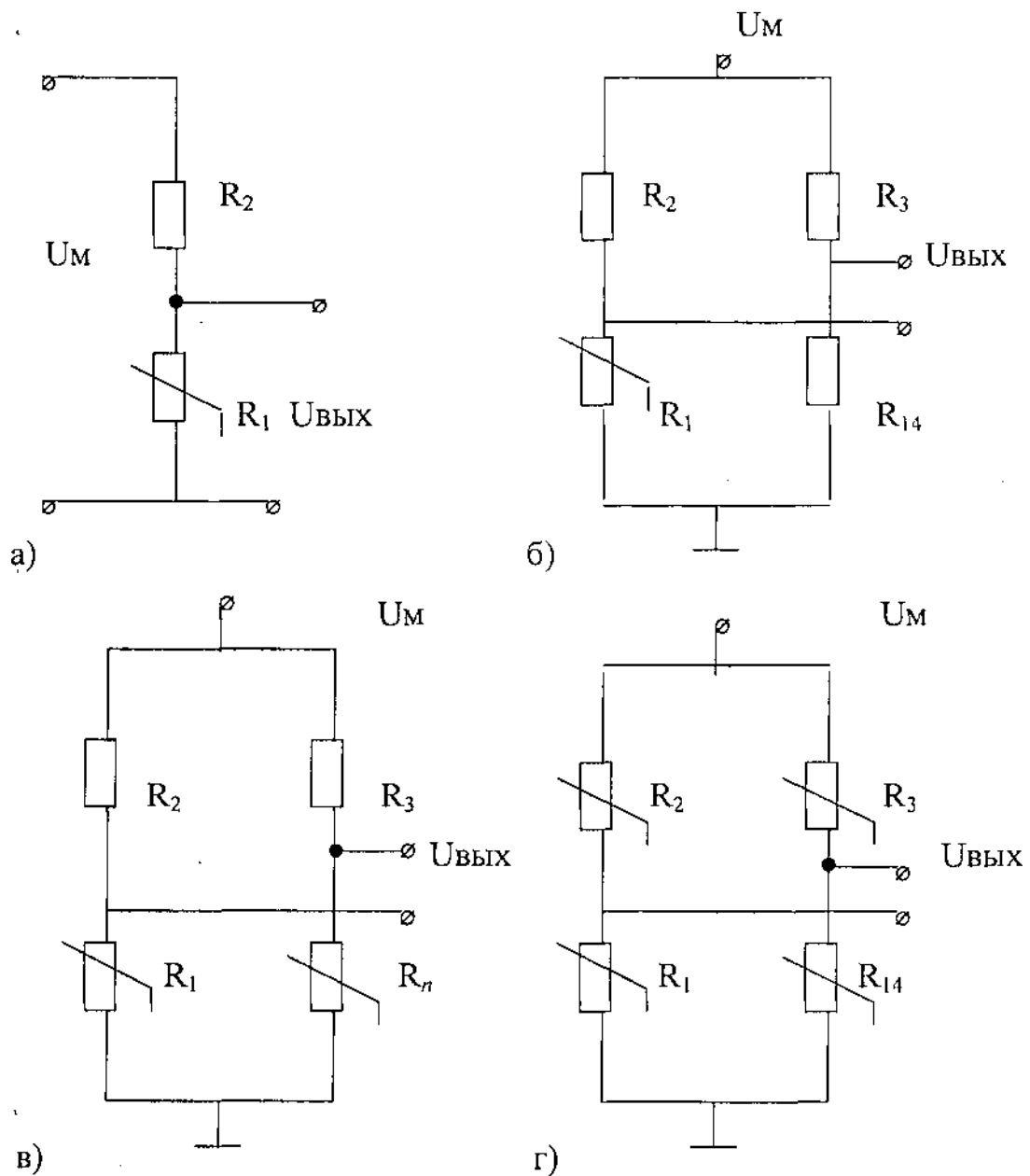


Рис. 3.2. Основные типы измерительных схем ТПТТ:

а) - делительная; б) - мостовая с одним активным плечом;

в) - мостовая с двумя активными плечами; г) - мостовая с четырьмя активными плечами;

3.2. Статические характеристики ТПТТ.

Данный тип преобразователя может применяться как для контроля скорости, так и температуры потока газа. Ввиду того, что данный тип преобразователя при его расположении поперек потока (рис.3.3) на его выходной сигнал будет оказывать как контролируемая температура T , так и скорость потока V , что будет вносить погрешность в результате измерения температуры и поэтому полупроводниковые термосопротивления предназначенные для контроля температуры потока должны располагаться вне потока газа в специальном «кармане», как показано рис.3.3.

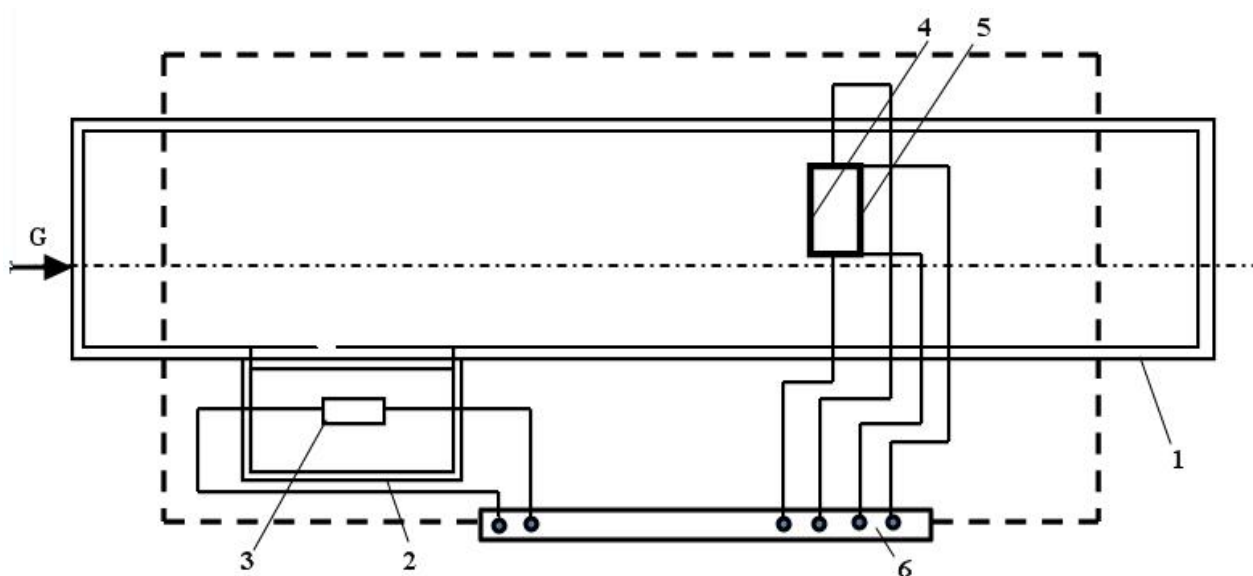


Рис. 3.3. Конструкция ТПТТ, предназначена для контроля малых расходов и температуры потока газа: 1- стеклянная трубка; 2-«карман» для термосопротивления R_{T1} ; 3-4- полупроводниковые термосопротивления; 5- нагревательный элемент; 6-штепсельный разъем.

Измерительная схема данного типа ТПТТ представлена на рис. 3.4.

Согласно измерительной схеме ТПТТ на рис. 3.4. при контроле расхода газа переключатель Π находится в положении «а» и выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ несет информацию о расходе G . При положении переключателя в положении «б» выходное напряжение будет нести информацию о температуре потока.

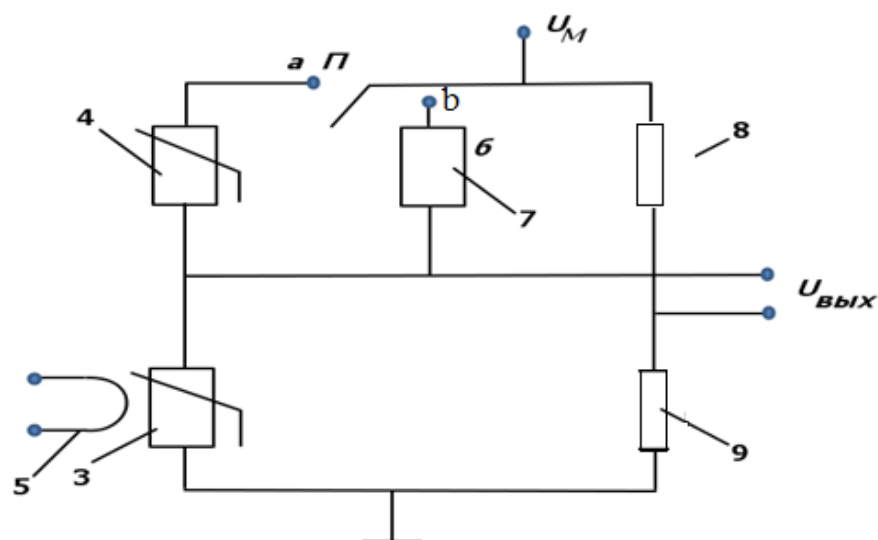


Рис. 3.4. Измерительная схема ТПТТ предназначенная для контроля скорости и температура потока газа.

На рис. 3.5. приведена статическая характеристика данного ТПТТ при преобразовании температуры потока.

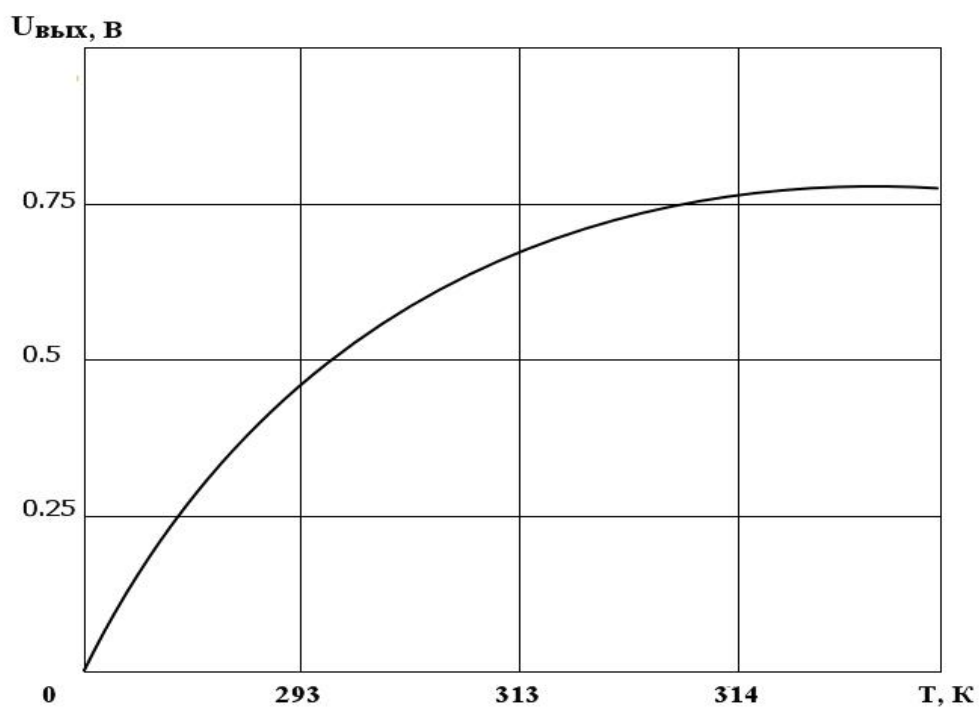


Рис. 3.5. Статическая характеристика ТПТТ при преобразовании температуры потока газа.

На рис. 3.6 приведены статические характеристики ТПТТ при положении переключателя Пб положении «а» при различных мощностях (токах нагревательного элемента).

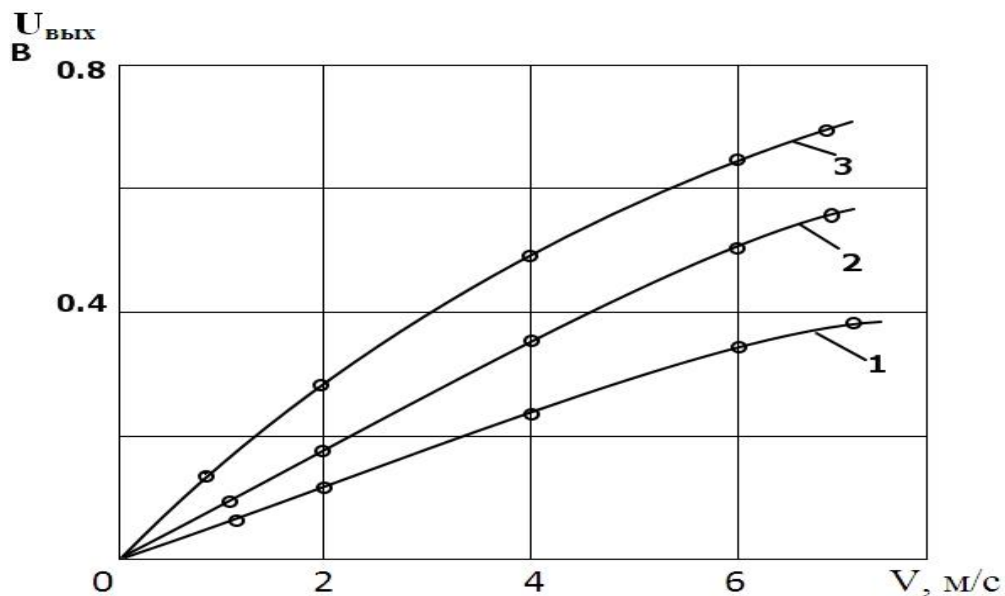


Рис. 3.6. Статические характеристики ТПТТ НЭ при токах: 1- $I_{НЭ}=0,045$ А; 2- $I_{НЭ}=0,07$ А; 3- $I_{НЭ}=0,10$ А; (линии – расчет, точки –экспериментальных значения)

На рис. 3.7. приведена статическая характеристика ТПТТ двухстороннего действия (при прямом к обратном потоке газа)

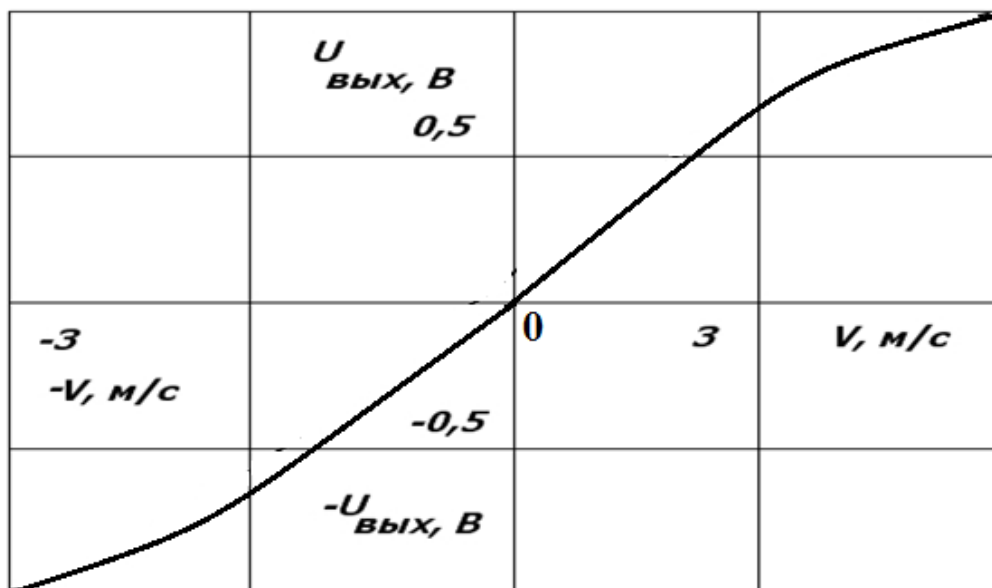


Рис. 3.7.Статическая характеристика многофункционального преобразователя на основе ТПТТ.

На рис. 3.6 представлены статические характеристики ТПТТ НЭ при различных токах нагревательного элемента: 1- $I_{НЭ}=0,045$ А; 2- $I_{НЭ}=0,07$ А; 3- $I_{НЭ}=0,10$ А.

Анализ статических характеристик данного типа показывает, что с увеличением тока нагревательного элемента существенно увеличивается чувствительность и расширяется диапазон измерений. Однако, ток нагревательного элемента не может быть беспредельно увеличен из-за потери надежности полупроводниковых термосопротивления и обмотки из тонкой нихромовой проволоки нагревательного элемента. Наиболее оптимальным является ток нагрева $I_{НЭ}=0,07$ А, который обеспечивает хорошую чувствительность в диапазон $V=0-7$ м/с.

На рис. 3.7. приведена статическая характеристика многофункционального преобразователя на основе данного типа ТПТТ. Подробно конструкция и измерительная схема многофункционального преобразователя описана в главе V и данная конструкция позволяет контролировать скорость, расход, направление и температуру потока газа.

3.3. Динамические характеристики ТПТТ.

Передаточная функция ТПТТ на основе протяженного теплопровода может быть представлена в виде

$$W_1(p) = \frac{\theta(0,p)}{\theta(l,p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1}, \quad (3.13)$$

$$K_1 = \frac{2}{2 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F}} l^2; \quad T_1 = \frac{1}{\frac{2\lambda F}{c_p \rho F l^2} + \frac{\alpha \pi d}{c_p \rho F}}$$

Передаточная функция от изменения мощности нагрева может быть

определена из выражения

$$W_2(p) = \frac{\theta(0,p)}{q(p)} = \frac{K_2}{T_2 p + 1}; \quad (3.14)$$

$$K_2 = \frac{\frac{l^2}{\lambda F}}{2 + \alpha \pi d \frac{l^2}{\lambda F}}; \quad T_2 = \frac{1}{\frac{2\lambda F}{C_p F l^2} + \frac{\alpha \pi d}{C_p F}}$$

В целом передаточная функция для ТПТТ получаются в виде трансцендентных функций. Использование, которых для анализа динамических характеристик ТПТТ затруднительно. Поэтому с целью упрощения анализа точные передаточные функции приведены к дробно-рациональному виду и представляются в виде передаточных функций первого порядка. Структуры постоянной времени T_1 и T_2 одинаковы. Для ТПТТ с длинными теплопроводами $l/d \gg 1$ постоянная времени может быть представлена в виде

$$T = T_1 = T_2 = \frac{C_p \rho F}{\alpha \pi d}$$

Для весьма коротких теплопроводов постоянная времени определяется из выражения.

$$T = \frac{\frac{C_p \rho F}{\lambda F} l^2}{2} \quad (3.15)$$

Для ТПТТ на основе тонких математических проводов постоянны времени T не превышен 1-2 сек.

Для ТПТТ с полупроводниковым термометром сопротивления без

дополнительного НЭ передаточную функцию можно записать в виде

$$W_1(p) = \frac{\theta(0, p)}{q(p)} = \frac{1}{Ch \left[\sqrt{(Cp\rho Fp + \alpha\pi d) \frac{1}{\lambda F}} \right] l} \quad (3.16)$$

После разложения в ряд функции «Ch» по степеням p и ограничиваясь первыми двумя членами разложения получим

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p + 1}; \quad (3.17)$$

$$K_1 = \frac{2}{2 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F}} l^2;$$

$$T_1 = \frac{1}{\frac{2\lambda F}{Cp\rho F l^2} + \frac{\alpha\pi d}{Cp\rho F}}$$

Таким образом, постоянная времени данного ТПТТ будет определяться в основном значениями $\frac{Cp\rho F}{\alpha\pi d}$. Если при разложении в степенной ряд учесть три члена, то передаточная функция будет иметь вид

$$W_1(p) = \frac{K_1}{T_1 p^2 + T_1 p + 1} \quad (3.18)$$

где:

$$K_1 = \frac{2}{24 + 12 \frac{\alpha\pi d l^2}{\lambda F} + \frac{(\alpha\pi d)^2 l^4}{(\lambda F)^2}}$$

$$T_1 = \frac{\frac{(Cp\rho F)^2}{(\lambda F)^2} l^4}{24 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2 (12 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2)}$$

$$T_2 = \frac{2 \frac{(Cp\rho F)^2 l^2}{\lambda F} (6 + \frac{\alpha\pi d l^2}{\lambda F})}{24 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2 (12 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2)}$$

Для ТПТТ с нагревательным элементом передаточная функция будет иметь вид

$$W_2(p) = \frac{\theta(0,p)}{q(p)} = \frac{Ch[\sqrt{(Cp\rho Fp + \alpha\pi d)\frac{1}{\lambda F}l}]^{-1}}{(Cp\rho Fp + \alpha\pi d)Ch[\sqrt{(Cp\rho Fp + \alpha\pi d)\frac{1}{\lambda F}l}]l} \quad (3.19)$$

После разложения данной трансцендентной передаточной функции в ряд по степеням p получим:

$$W_2(p) = \frac{K_2}{T_2 p + 1} \quad (3.20)$$

где:

$$K_2 = \frac{\frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2}{2 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2}$$

$$T_2 = \frac{1}{\frac{2\lambda F}{Cp\rho F l^2} + \frac{\alpha\pi d}{Cp\rho F}}$$

При разложении в степенной ряд учесть три члена, то получим

$$W_2(p) = \frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 p^2 + T_3 p + 1} \quad (3.21)$$

где:

$$K_2 = \frac{\frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2 (12 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2)}{24 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2 (12 + \frac{\alpha\pi d}{\lambda F} l^2)}$$

$$T_1 = \frac{\frac{c_p \rho V}{\lambda F} l^2}{\left(12 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F} l^2\right)}$$

$$T_2 = \frac{\frac{(c_p \rho V)^2}{(\lambda F)^2} l^4}{24 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F} l^2 \left(12 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F} l^2\right)}$$

$$T_3 = \frac{\frac{c_p \rho V}{\lambda F} l^2 \left(12 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F} l^2\right)}{24 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F} l^2 \left(12 + \frac{\alpha \pi d}{\lambda F} l^2\right)}$$

На основании передаточной функции (3.21) получена кривая переходного процесса ТПТТ на рис. 3.8

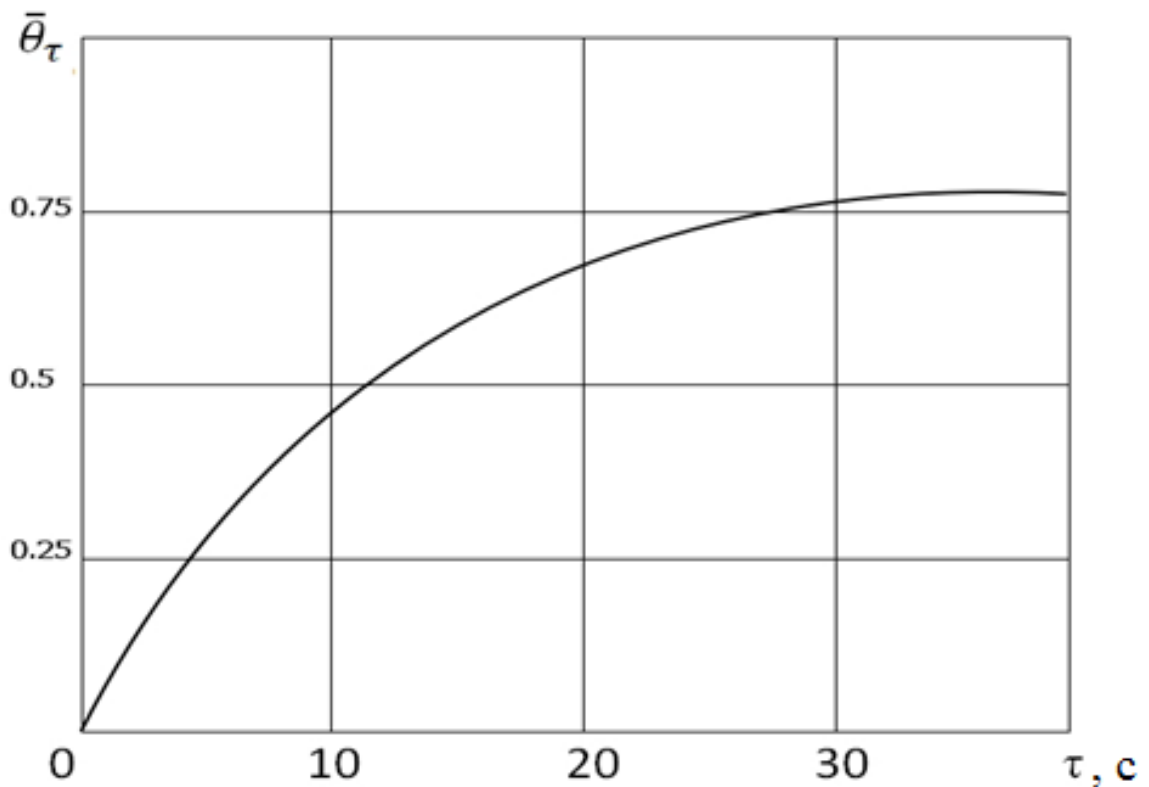


Рис. 3.8 Динамическая характеристика ТПТТ.

3.4. Надежность ТПТТ.

Надежность расходомера на основе преобразователя термоанемометрического типа может быть рассчитана также на основе графовой модели, из которой сразу можно выделить все основные элементы (цепи) прибора. На основе известных значений надежности элементов можно определить надежность всей конструкции прибора. Такой подход позволяет уже на стадии проектирования оценить надежность прибора. Однако, при эксплуатации прибора в результате отклонения параметров и величин от номинальных значений растет число постепенных отказов и надежность уменьшается в течение определенного периода эксплуатации. Учет постепенных отказов из-за изменения параметров прибора привел к параметрическому подходу в оценке надежности прибора. Параметрический подход основан на вероятности того, что выходной сигнал ТПТТ (U_{32}) будет лежать в допустимых границах при нормальном законе распределения значения выходного сигнала при заданной точности работы ТПТТ.

В общем случае статическую характеристику ТПТТ можно записать в виде

$$U_{32} = S \cdot X_{bx}, \quad (3.22)$$

где: S - чувствительность ТПТТ Из
(3.24) можно записать

$$S = U_{32}/X_{BX} \quad (3.23)$$

При анализе надежности ТПТТ удобно рассматривать вероятность $P(S)$ того, что чувствительность S будет лежать в допустимых пределах и определяется следующим

$$P(S) = \frac{1}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \int_{S-\Delta S}^{S+\Delta S} e^{-\frac{(S-s)^2}{2\sigma_S^2}} ds = \Phi(S_2) - \Phi(S_1) \quad (3.24)$$

где: S - среднее значение чувствительности;

σ_s - среднеквадратическое отклонение чувствительности;

ΔS - допустимое отклонение чувствительности.

Из статической характеристики, можно определить, что чувствительность является функцией основных величин

$$s = f(P_{HЭ}, U_M, K, \alpha_0) \quad (3.25)$$

Максимальное значение чувствительности $S_{\text{макс}}$ является некоторой функцией величин и параметров, входящих в формулу (3.25). Разлагая (3.25) в ряд Тейлора в окрестности точки $S_{\text{макс}}$, где все параметры принимают номинальные значения, и ограничиваясь линейными членами разложения, получим

$$S_{\text{макс}} = S_{\text{макс н}} + \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_{P_{HЭ}}} \right)_{P=P_H} \Delta P_{HЭ} + \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_{U_M}} \right)_{U_M=U_{MM}} U_M + \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_K} \right)_{K=K_a} \Delta K + \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_{\alpha_0}} \right)_{\alpha_0=\Delta \alpha_m} \Delta \alpha_0 \quad (3.26)$$

Величины и параметры $P_{HЭ}$, U_M , K и α_0 считаем с нормально распределенными значениями $P_{MЭH}$, U_{MM} , K_M и α_{0H} и дисперсиями $\sigma_{P_{HЭ}}^2$, $\sigma_{U_M}^2$, $\sigma_{K_H}^2$, $\sigma_{\alpha_0}^2$. Очевидно, отклонения $\Delta P_{HЭ}$; ΔU_M ; ΔK ;

$\Delta \alpha_0$ будут также нормально распределены с дисперсиями и нулевыми средними значениями. Математическое ожидание $S_{\text{макс}}$ и дисперсия a^2_s определяются из нижеприведенных зависимостей

$$S_{\text{макс}} = f(P_{HЭH}, U_M, K_H, \alpha_{0H}) \quad (3.27)$$

$$\sigma_s^2 = \sigma_{P_{HЭ}}^2 + \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_{P_{HЭ}}} \right)_{P_{HЭ}=P_{HЭH}}^2 + \sigma_{U_M}^2 \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_{U_M}} \right)_{U_M=U_{Mл}}^2 + \sigma_K^2 \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_K} \right)_{K=K_H}^2 + \left(\frac{\sigma_{S_{\text{макс}}}}{\sigma_{\alpha_0}} \right)_{\alpha_0=\Delta \alpha_H}^2 \quad (3.28)$$

Зная закон распределения, можно определить вероятность попадания

величины S_{MaKc} в зону допустимых отклонений и вероятность безотказной работы

$$P = P\{t_1 S_{\text{MAKc H}} - \Delta S_{\text{MAKc H}} \leq S_{\text{MAKc}} \leq S_{\text{MAKc H}} + \Delta S_{\text{MAKc H}}\} = \Phi\left(\frac{\Delta S_{2\text{MAKc H}}}{\sigma_S}\right) - \Phi\left(\frac{\Delta S_{1\text{MAKc H}}}{\sigma_S}\right) \quad (3.29)$$

Подставляя значения частных производных в (3.29) можно определить σ_S^2 .

Оценим надежность ТПТТ при следующих данных

$$U = 220 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; P_{\text{HЭ}} = 10 \text{ Вт}; U_M = 6 \text{ В}; K = 2;$$

Коэффициенты влияния:

$$S_{P_{\text{HЭ}}} = \frac{\partial S_{\text{MAKc P}_{\text{HЭ}}}}{\partial P_{\text{HЭ}}} S_{\text{MAKc}} = 1; S_{U_M} = \frac{\partial S_{\text{MAKc } U_M}}{\partial U_M} S_{\text{МАЛ}} = 1; S_K = 0,015; S_{\alpha_0} = 0,015 \quad (3.30)$$

Отклонения параметров и величин ТПТТ от номинальных значений

Факторы	$\Delta P_{\text{HЭ}} / P_{\text{HЭ}}$	$\Delta U_M / U_M$	$\Delta K / K$	$\Delta \alpha_0 / \alpha_0$	
температура	+ 0,15	+ 0,06	0,05	+ 1	при изм. на 10 °С
Старен.	0	0	0	+0,5	Срок
Приведенные	+0,2	+0,05	+0,05	+ 1,0	

Надежность ТПТТ в отношении постепенных отказов с учетом дестабилизирующих факторов при погрешности не более 1,0% и

$$\Delta S_{\text{MAKc}} / S_{\text{MAKc}} = 0,45 \quad (3.30)$$

$$P = \Phi\left(\frac{\Delta S_{\text{МАКС}}}{\delta_s}\right) - \Phi\left(-\frac{\Delta S_{\text{МАКС}}}{\delta_s}\right) = \Phi\left(\frac{1}{0,45}\right) - \Phi\left(-\frac{1}{0,45}\right) \quad (3.31)$$

Полная надежность ТПТТ равна

$$P = P_{\text{АПТ}} \cdot P_{\text{ПАР}} = 0,9989 \cdot 0,976 = 0,9644 \quad (3.32)$$

3.5. Анализ погрешностей ТПТТ и методов их компенсации.

По способу численного выражения погрешности ТПТТ подразделяются на абсолютные, относительные и приведенные.

При линеаризации статической характеристики ТПТТ и наличии только аддитивной составляющей погрешности $\gamma_a = \pm \Delta_0$ и величина относительной погрешности $\gamma_0 = \pm \frac{\Delta_0}{x}$. При наличии только мультипликативной составляющей погрешности текущее значение абсолютной погрешности $\gamma_a = \gamma_k \cdot x$ и величина относительной погрешности $\gamma_a = \gamma_k$, γ_k - относительная погрешность изменения чувствительности ТПТ.

При наличии одновременно аддитивной и мультипликативной составляющих погрешностей определяется выражением

$$\Delta_{\text{П}} = 2\Delta_0 + 2\gamma_k x \quad (3.33)$$

Научно обоснованную возможность нормирования точности ТПТТ предоставляет информационная теория измерительных устройств [], в которой введена энтропийная погрешность Δ_s . В результате введения энтропийной погрешности Δ_s учитывается закон распределения случайной погрешности через энтропийный коэффициент K_s , и точность ТПТ может быть выражена соотношением

$$A = \frac{x}{d} = \frac{x}{2\Delta_s} = \frac{1}{2\gamma_s} \quad (3.34)$$

где: x - текущее значение контролируемой величины;

d - соответствующая значению x ширина зоны неопределенности;

Δ_a - энтропийная абсолютная погрешность;

γ_Δ - соответствующая энтропийная относительная погрешность.

При оценке погрешности ТПТТ удобно использовать энтропийное значение погрешности Δ_Δ , которое связано со среднеквадратической погрешностью ТПТТ $\sigma_{ТПТТ}$ посредством энтропийного коэффициента K_Δ []

$$\Delta_\Delta = K_\Delta \cdot \sigma_{ТПТТ} \quad (3.35)$$

Количество измерительной информации I_H достаточно полно и обобщенно определяет точность ТПТТ, а энтропийная погрешность Δ_Δ является мерой информационно-разрешающей способности преобразователя

$$I_H = \ln \frac{x_2 - x_1}{2 \Delta_\Delta} \quad (3.36)$$

где: $x_2 - x_1$, - диапазон преобразований.

Вышеизложенное хорошо согласуется с современным подходом к понятию погрешности измерения как к неопределенности результата измерения [] и когда значение измеряемой величины с помощью преобразователя или прибора лежит на участке неопределенности на шкале возможных значений измеряемой величины.

На рис. 3.17 приведена классификация источников погрешностей ТПТТ, которые разделены на основные и дополнительные. Источники основной погрешности имеют место при нормальных условиях эксплуатации; т.е. при нормальном напряжении питания, при нормальной температуре окружающей среды, отсутствии внешних тепловых и других физических полей. Источники дополнительных погрешностей появляются при отклонении условий эксплуатации от нормальных.

Источники основной погрешности делятся на методические, инструментальные и эксплуатационные, а дополнительные погрешности делятся

на внутренние и внешние.

Методические источники погрешностей проявляются прежде всего в нелинейности статической характеристики ТПТТ, в тепловой инерционности теплопровода, нагревательных и термочувствительных элементов и в наличии теплопотерь и оттока тепла по теплопроводу и по держателям термочувствительных и нагревательных элементов.

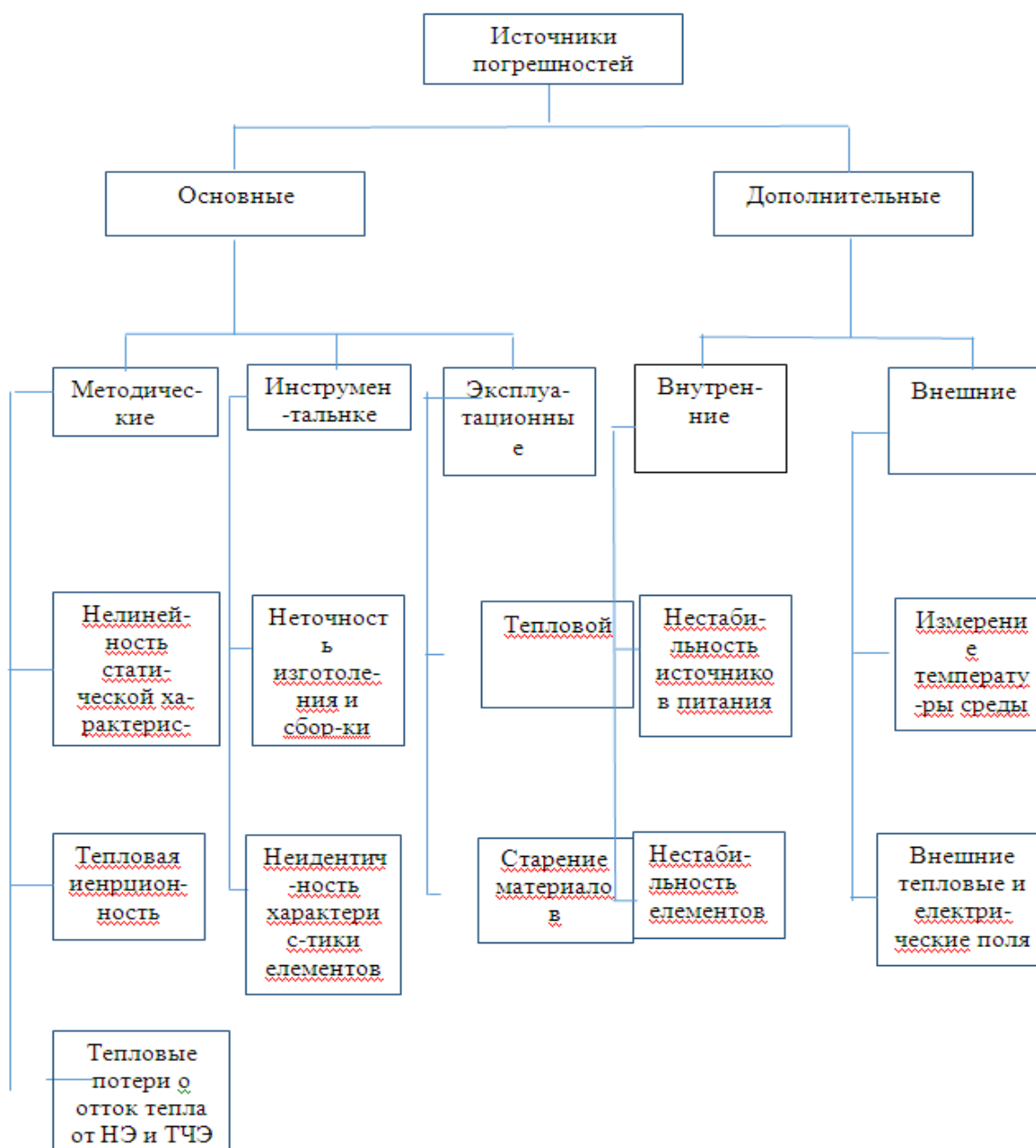


Рис. 3.17 Классификация источников погрешностей ТПТТ

Инструментальные источники основной погрешности зависят от неточности изготовления и сборки элементов и всей конструкции ТПТТ, а также от неидентичности характеристик нагревательных, термочувствительных элементов и других элементов ТПТТ. Эксплуатационные источники погрешности проявляются из-за теплового

гистерезиса и старения элементов ТПТТ в период эксплуатации. К внутренним источникам дополнительной погрешности относятся нестабильность напряжений питания нагревательных и измерительных цепей и нестабильность нагревательных, термочувствительных и других элементов конструкции ТПТТ.

Внешние источники дополнительной погрешности заключаются в нестабильности внешних факторов: температуры, давления, влажности, а также в наличии внешних тепловых, электрических и других физических полей, которые могут воздействовать на элементы ТПТТ. По характеру зависимость погрешностей от уровня входной величины, как было указано выше, удобно их разделить на аддитивные и мультипликативные.

Аддитивная погрешность возникает из-за несовершенства изготовления ТПТТ, а также вследствие изменения с течением времени параметров и условий работы ТПТТ: температуры, напряжения питания и других возмущающих воздействий.

Мультипликативная погрешность возникает из-за несоответствия конструктивных параметров ТПТТ их номинальным значениям или из-за изменения этих параметров во время эксплуатации. Мультипликативная погрешность в отличие от аддитивной погрешности зависит от уровня входной величины и поэтому компенсировать эту погрешность необходимо путем регулировки чувствительности ТПТТ.

Нелинейность статической характеристики вносит погрешность, максимальное значение, которой количественно равно степени нелинейности, определяемое по формуле:

$$\gamma_{НЛ} = 0,5 \frac{U_{ВЫХ НЛ} - U_{ВЫХЛ}}{U_{ВЫХ МАКС} - U_{ВЫХ МИН}} \quad (3.37)$$

Где: $U_{ВЫХНЛ}$ и $U_{ВЫХЛ}$ - нелинейные и линейные значения выходного напряжения ТПТТ.

К основным приемам, которые применяются для уменьшения степени нелинейности ТПТТ относятся: применение режима работы при $\Delta T = \text{const}$; ограничение диапазона; смещение начала диапазона и коррекция нелинейности с помощью микропроцессорных устройств.

Наиболее существенным источником погрешностей ТПТТ является тейловая инерционность теплопровода и других элементов. В общем случае динамическая погрешность ТПТТ может быть определена как абсолютная

$$\Delta_A U_{ВЫХ}(\tau) = U_{ВЫХ}(\tau) - U_{ВЫХ}(\tau \rightarrow \infty) \quad (3.38)$$

или относительная динамическая погрешность

$$\Delta_{ОТН} U_{ВЫХ}(\tau) = \frac{U_{ВЫХ}(\tau) - U_{ВЫХ}(\tau \rightarrow \infty)}{U_{ВЫХ}(\tau \rightarrow \infty)} 100\% \quad (3.39)$$

Для изменения динамических погрешностей тепловых преобразователей используют как улучшение конструкции ТПТТ с точки зрения уменьшения тепловой инерции, так и использование электрических корректирующих устройств как был показан в §3.3 Также существенным источником погрешностей ТПТТ является влияние изменений температуры потока воздуха.

При статической характеристике ТПТТ вида

$$U_{ВЫХ} = U_{П} \frac{K}{(K+1)^2} (E_1 - E_2) \quad (3.40)$$

Частные производные от $U_{ВЫХ}$ по R_{11} и R_{12} будут

$$\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial R_{11}} = U^n \frac{K}{(K+1)^2} \cdot \frac{\partial E_1}{\partial R_{11}} \quad (3.41)$$

и

$$\frac{\partial U_{\text{ВЫХ}}}{\partial R_{12}} = U^n \frac{K}{(K+1)^2} \cdot \frac{\partial E_2}{\partial R_{12}} \quad (3.42)$$

и зависимость выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ от температуры будет

$$K_T = U^n \frac{\alpha_o R_0 K}{(K+1)^2} \cdot \left(\frac{\partial E_1}{\partial R_{11}} - \frac{\partial E_2}{\partial R_{12}} \right) \quad (3.43)$$

Следовательно, компенсация температурной погрешности имеет место при условии

$$\frac{\partial E_1}{\partial R_{11}} = \frac{\partial E_2}{\partial R_{12}} \quad (3.44)$$

Оценку суммарной погрешностью ТПТТ как было указано выше целесообразно произвести на основе положений информационной теории измерительных устройств []. Согласно которой погрешность измерительных устройств однозначно определяется значением энтропийной погрешности, а энтропийный коэффициент K_Σ зависит от вида закона распределения плотности вероятности погрешностей основных элементов ТПТТ: теплопровода с нагревательным и термочувствительным элементом (полупроводниковым термосопротивлением), мостовой измерительной схемы ИС, операционного усилителя U_c и индикаторного устройства U_k . Полупроводниковое термосопротивление (которое функционально объединено с теплопроводом и нагревательным элементом) имеет аддитивную погрешность, нормированную предельным значением

$$U_{\text{ТЧЭ}} = 0,2\% \quad (3.45)$$

и подключена к плечу мостовой измерительной схеме, которая также имеет аддитивную погрешность $\gamma_{нс} = 0,1 \%$.

Измерительная схема ИС питается от стабилизатора СТ, который с усилителем УС питается от общего блока питания БП. В качестве УС используется операционный усилитель, который линеаризует статическую характеристику и имеет большое входное сопротивление. Выходным указателем $Ук$ служит, например магнитоэлектрический прибор класса 0,5.

Прежде всего, разделим все составляющие погрешности на аддитивные и мультипликативные и припишем каждой из них соответствующий закон распределения и найдем их среднеквадратические отклонения. Все расчеты выполняются в относительных приведенных значениях и при промежуточных округлениях сохраняется лишний недостоверный десятичный знак в их значениях.

Пусть аддитивная погрешность всего комплекта преобразователя обусловлена аддитивными погрешностями ТЧЭ, ИС и $Ук$, а мультипликативная - колебаниями напряжения питания ИС и УС, а также зависимостью от температуры чувствительности усилителя УС и указателя $Ук$.

Закон распределения погрешности ТЧЭ можно принять нормальным с энтропийным коэффициентом $K_{тчэ} = 2,07$. Отсюда среднеквадратическое отклонение (СКО) равно

$$\sigma_{тчэ} = \gamma_{тчэ} / K_{тчэ} = 0,2 / 2,07 = 0,097 \% \quad (3.46)$$

Аналогично для измерительной схемы ИС при нормальном законе распределения погрешности имеем

$$\sigma_{ис} = 0,2 / 2,07 = 0,048 \% \quad (3.47)$$

Погрешность класс точности электроизмерительных приборов по стандарту указывается с запасом старение. Поэтому предельную погрешность $Ук$ можно

оценить значением $\gamma_{ук} = 0,8 \gamma_{ук}$, где $\gamma_{ук}$ - основная погрешность соответствующая классу точности.

Отсюда $\gamma_{ук} = 0,8 \cdot 0,5 = 0,40\%$. Закон распределения погрешностей стрелочных электромеханических приборов близок к трапецеидальному с энтропийным коэффициентом $K_{ук} = 1,9$. Поэтому

$$\sigma_{ук} = \gamma_{ук} / 1,9 = 0,40 / 1,9 = 0,21\% \quad (3.48)$$

Аддитивная погрешность прибора будет образована суммой трех составляющих. Поэтому СКО погрешности нуля прибора составит

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{ТЧЭ}^2 + \sigma_{ИС}^2 + \sigma_{УК}^2} = \sqrt{0,097^2 + 0,048^2 + 0,21^2} = 0,236\% \quad (3.49)$$

Для определения энтропийного коэффициента суммы этих погрешностей необходимо обратиться к кривым зависимости энтропийных коэффициентов от относительных весов дисперсии, приведенных в работе [15].

Относительный вес дисперсии трапецеидального распределения в суммарной дисперсии составляет $P = \sigma_{УК}^2 / \sigma_H^2 = 0,21^2 / 0,236^2 = 0,79$. При этом значении P величина $k_H = 2,0$. Отсюда энтропийное значение погрешности нуля прибора составит

$$\gamma_H = K_{HON} = 2,00 \cdot 0,236 = 0,47\% \quad (3.50)$$

Переходя к суммированию мультипликативных погрешностей, примем следующие исходные данные. Пусть коэффициент влияния температуры на чувствительность указателя равен $\Psi_{УН} = -0,2\%/10^\circ\text{К}$ и усилителя $\Psi_{УС} = +0,1\%/10^\circ\text{К}$. Если усилитель располагается в корпусе указателя, то оба они находятся всегда при одной и той же температуре и, следовательно, их температурные погрешности достаточно жестко коррелированы между собой и должны суммироваться не геометрически, а алгебраически. Отсюда результирующий коэффициент влияния температуры равен $\Psi_\theta = -0,2 + 0,1 = -0,1\%/10^\circ\text{К}$. Пусть прибор предназначен для работы в цеховых условиях при температуре от $+5$ до $+35^\circ\text{С}$, т.е. при температуре

$(20 \pm 15)^\circ\text{C}$, и все значения температур равновероятны. Тогда, температурная составляющая мультипликативной погрешности имеет равномерное распределение с $\gamma_{\theta m} = 0,1 \cdot 15/10 = 0,15\%$ и $\sigma_{\theta} = \gamma_{\theta m}/K_{\theta} = 0,15/1,73 = 0,087\%$.

Пусть колебания напряжения сети, от которой питается рассматриваемый прибор, находятся в пределах $\pm 10\%$ и имеют треугольный закон распределения вероятности. ИС питается через стабилизатор с коэффициентом стабилизации $K=25$. Тогда колебания напряжения питания ИС, а следовательно, и мультипликативная погрешность его выходного напряжения имеют также треугольное распределение в пределах

$$\gamma_{\text{ИС}} = 10/25 = 0,40\% \text{ с СКО } \sigma_{\text{ИС}} = \gamma_{\text{ИС}}/\sqrt{6} = 0,40/\sqrt{6} = 0,163\% .$$

Ус питается нестабилизированным напряжением, но благодаря глубокой отрицательной обратной связи коэффициент влияния питающего напряжения на коэффициент усиления усилителя снижен до значения $\Psi_{\theta \text{УС}} = 0,3/[10 (\Delta_{\text{И}}/U)]$. Поэтому мультипликативная погрешность прибора, вызванная случайными колебаниями напряжения питания, будет распределена также по треугольному закону в предел $\gamma_{\text{УСМ}} = \pm 0,30\%$ с СКО $\sigma_{\text{УСМ}} = \gamma_{\text{УСМ}}/\sqrt{6} = 0,3/\sqrt{6} = 0,122\%$.

Так как обе погрешности от колебания напряжения вызываются одной и той же причиной, то они коррелированы между собой и складываются алгебраически, а не геометрически, хотя каждая из них случайна. Поэтому $\gamma_{\text{ИМ}} = \gamma_{\text{УСМ}} + \gamma_{\text{ДТ}} = 0,3 + 0,4 = 0,70\%$ и $\sigma_{\text{И}} = \sigma_{\text{ИУС}} + \sigma_{\text{ИД}} = 0,122 + 0,163 = 0,285\%$. Суммарные погрешности от колебаний температуры и колебаний напряжения независимы и поэтому складываются геометрически, т.е. с СКО мультипликативной составляющей $\sigma_{\text{М}} = \sqrt{\sigma_{\text{И}}^2 + \sigma_{\theta}^2} = \sqrt{0,285^2 + 0,087^2} = 0,298\%$. Распределение суммарной мультипликативной составляющей есть композиция равномерного распределения погрешности от колебаний температуры с $\sigma_{\theta} = 0,087\%$ и $K_{\Sigma} = 1,73$ и

треугольного распределения погрешности от колебаний напряжения питания

с
$$\sigma_{\text{И}} = 0,285\% \text{ и } K_{\text{Э}} = 2,02.$$

Относительный вес дисперсии равномерно распределенной составляющей в суммарной дисперсии $P = \sigma_{\theta}^2 / \sigma_{\text{М}}^2 = 0,087^2 / 0,298^2 = 0,08$ и энтропийный коэффициент этой композиции равен $K = 2,04$. И энтропийное значение мультипликативной составляющей погрешности равно

$$\gamma_{\text{М}} = K_{\text{М}} \cdot \sigma_{\text{М}} = 2,04 \cdot 0,298 = 0,61\%$$

Результирующая погрешность прибора в конце шкалы складывается из аддитивной и мультипликативной погрешностей по правилам суммирования независимых погрешностей:

$$\sigma_{\text{М}} = \sqrt{\sigma_{\text{Н}}^2 + \sigma_{\text{М}}^2} = \sqrt{0,236^2 + 0,298^2} = 0,38\% \quad (3.51)$$

Энтропийные коэффициенты суммируемых погрешностей $K_{\text{Н}} = 2,00$ и $K = 2,04$ достаточно велики, а их СКО близки между собой ($\sigma_{\text{Н}} = 0,236\%$ и $\sigma_{\text{Н}} = 0,298\%$), поэтому результирующее распределение достаточно близко к нормальному с $K = 2,07$. Отсюда энтропийное значение погрешности в конце шкале прибора равно

$$\gamma_{\text{К}} = K_{\text{К}} \cdot \sigma_{\text{К}} = 2,07 \cdot 0,38 = 0,79\%$$

При нормировании погрешности ТПТ по стандарту необходимо иметь данные на старение не менее 25% фактической погрешности, а нормируемые значения погрешности должны быть выбраны из ряда предпочтительных чисел, предусмотренных ГОСТом. Для данного прибора класс точности может быть 1,0.

Глава IV. Проектирование и практическое применение ТПТТ для систем контроля и управления параметрами потоков газов и жидкостей.

4.1 Общие вопросы проектирования ТПТТ.

Проектирование тепловых преобразователей термоанемометрического типа состоит из двух этапов: выбора оптимальной структуры и выбора оптимальных параметров преобразователя.

Выбор оптимальной структуры преобразователей основан на разработке морфологических таблиц основных элементов и выбора на их основе оптимальных элементов и в последующем компоновка оптимальной конструкции теплового преобразователя термоанемометрического типа. После выбора оптимальной конструкции целесообразно эту конструкцию сравнить с несколькими аналогами и прототипами с целью получения патента на разработанную конструкцию. После разработки конструкции преобразователя осуществляется переход к выбору оптимальных параметров с целью более полного удовлетворения современным требованиям к тепловым преобразователям малых расходов.

4.2 Методика выбора оптимальной структуры ТПТТ.

В главе 1 было показано, что тепловые преобразователи термоанемометрического типа имеют следующие основные элементы: источник теплового потока (нагревательный элемент); теплопровод, термочувствительные элементы; измерительные схемы.

Для выбора оптимальной структуры преобразователя необходимо разработать банк вышеуказанных основных элементов преобразователей и тогда выбор структуры конкретного элемента и всей конструкции будет сведен к выбору элементов из банка и компоновки конструкции преобразователя на основе выбранных оптимальных элементов.

С этой целью была разработана автоматизированная система поиска и выбора структуры (АСПС), которая является интеллектуальной поддержкой

проектировщика на этапе выбора оптимальной структуры теплового преобразователя термоанемометрического типа. Система АСПС позволяет создать множество вариантов элементов и выбрать из этого множества оптимальную структуру преобразователя по следующим критериям: чувствительность, цена, надежность, погрешность, нелинейность, диапазон по входу, потери в Вт, быстродействие, экологичность и вес.

База данных в виде совокупности морфологических таблиц создана по следующим основным элементам: источник тепла, теплопроводы, термочувствительные элементы и измерительные схемы (таблица 4.1).

Первая морфологическая таблица М.1 содержит следующие основные формы теплопроводов: 1.1 - тонкая металлическая проволока; 1.2 - стержневая; 1.3 - трубчатая форма (отрезок металлической трубки); 1.4 - каплевидная.

Вторая морфологическая таблица М.2 содержит следующие формы термочувствительных элементов: 2.1 - бусиновая (шарообразная); 2.2 - тонкая металлическая проволока; 2.3 - цилиндрическая (например, полупроводниковый термистор); 2.4 - обмотка из тонкой металлической проволоки (например, термометра сопротивления).

Третья морфологическая таблица М.3 содержит следующие типы измерительных схем: 3.1 - мостовая; 3.2 - микропроцессорная; 3.3 - дифференциальная; 3.4 - делительная.

Четвертая морфологическая таблица М.4 содержит следующие формы источников тепла: 4.1 - шарообразная; 4.2 - обмотка из тонкой металлической проволоки; 4.3 - цилиндрическая; 4.4 - тонкая металлическая плёнка.

Поисковая система АСПС разработана на основе программы Тога Сошшапдег. Для ввода системы в работу находим на экране компьютер; локальный диск Б. Далее находим необходимую папку и открываем морфологические таблицы термоанемометрического преобразователя. Перед поиском структуры можно

рассмотреть базу данных по всем вышеуказанным элементам. Выбрав показатель качества (критерий) можно получить компоновочную конструкцию термоанемометрического преобразователя.

Различные сочетания рассмотренных элементов в морфологических таблицах дают ту или иную структуру термоанемометрического преобразователя.

На основе программы АСПС из первой таблицы выбирается форма теплопровода, из второй таблицы выбирается форма термочувствительного элемента, из третьей таблицы выбирается вид измерительной схемы, а из четвертой таблицы выбирается форма источника тепла. В результате компоновки этих элементов получаем новую конструкцию преобразователя.

На рис. 4.1 приведены компоновки конструкции теплового преобразователя термоанемометрического типа по критерию «цена», которая состоит из элементов морфологических таблиц: 1.2 - 2.3 - 3.4 - 4.2.

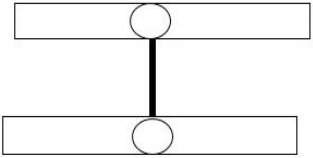
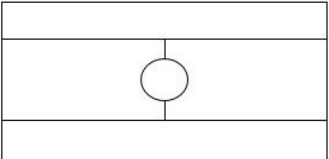
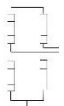
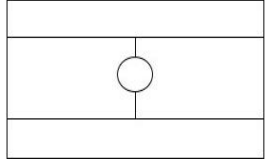
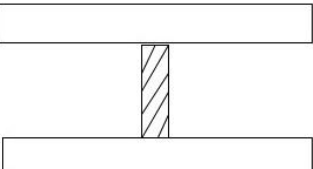
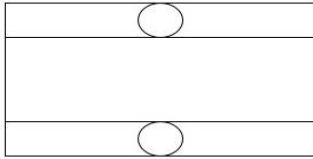
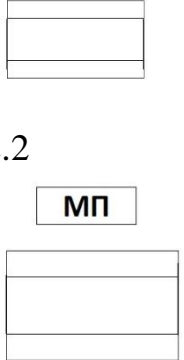
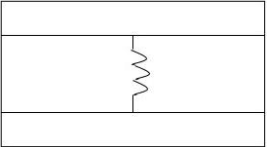
Наиболее «надежная» конструкция соответствует элементам: 1.2 - 2.3 - 3.2-4.3.

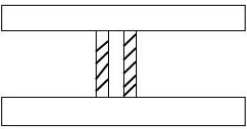
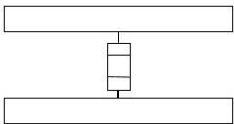
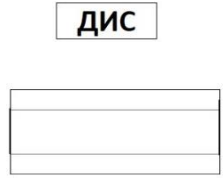
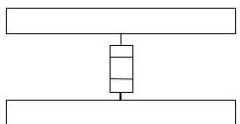
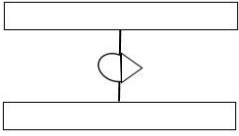
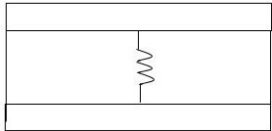
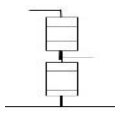
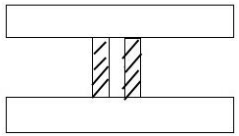
Аналогично могут быть выбраны структуры конструкций термоанемометрических преобразователей по следующим критериям «чувствительность», «диапазон», «быстродействие» и другие.

Конечно, полученные структуры термоанемометрического преобразователя еще не дают окончательную конструкцию для последующей разработки, так как это пока только механическое соединение элементов. Однако, получив первые несколько конструкций, можно обратиться к фонду патентов и изобретений и сравнить их с аналогами и прототипами. Далее применяя технологические приемы усовершенствования можно (как было показано в главе I доработать конструкцию до уровня требований патента и получить патент.

Морфологическая таблица элементов ТПТТ

Таблица 4.1

Форма теплопровода	Форма термочувствительного эл	Вид измерительной схемы	Форма источника тепла
<p>1.1</p> 	<p>2.1</p> 	<p>3.1</p> 	<p>4.1</p> 
<p>1.2</p> 	<p>2.2</p> 	<p>2.2</p> <p>МП</p> 	<p>4.2</p> 

Форма теплопровода	Форма термочувствительного эл	Вид измерительной схемы	Форма источника тепла
<p>1.3</p> 	<p>2.3</p> 	<p>3.3</p> <p>ДИС</p> 	<p>4.3</p> 
<p>1.4</p> 	<p>2.4</p> 	<p>4.3</p> 	<p>4.4</p> 

В целом выбор структуры ТПТТ производится по алгоритму, схема которого приведена на рис. 4.2. Выбор структуры ТПТТ начинается вводом требований (диапазон, чувствительность, число параметров контроля и другие) и все это в блоке 1. сами требования формируются по запросам систем контроля и управления (блок 2). Далее в блоке 3 осуществляется выбор оптимальной структуры согласно требованиям. Для этого обращаются как было показано выше к морфологическим матрицам основных элементов (блок 4), которые были, в свою очередь, синтезированы на основании анализа существующих конструкций преобразователей аналогичного назначения и взятых из фонда научно-технической информации (блок 10). В блоке 5 осуществляется проверка соответствия выбранного варианта требованиям и при его приемлемости осуществляется переход к компоновке конструкции

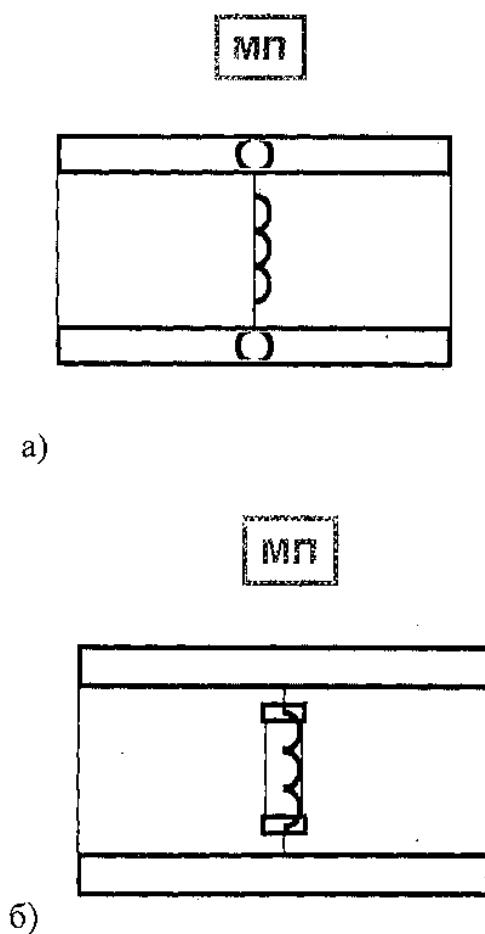


Рис. 4.1. Примеры компоновок конструкции ТПТТ по критериям: а) «цена»; б) «надежность» преобразователя.

Далее осуществляется сравнение полученной конструкции преобразователя с существующими аналогами и прототипами из фонда научно-технической информации (блок 10). Если отличия нет, то, применяя обобщенные приемы усовершенствования конструкций и варьируя элементами из блока 4, изменяем компоновку конструкции преобразователя до достижения существенного отличия от известных конструкций и получения новой конструкции (блок 12), которая может быть защищена патентом. На основе данной методики нами была разработана конструкция, описание которой приведено ниже [].

Следует еще раз подчеркнуть значение обобщенных приемов усовершенствования, так как они играют существенную роль в получении новых технических решений в области преобразователей. Как указывалось в главе I обобщенные приемы усовершенствования являются конструктивно-технологическими приемами и представляют собой краткое правило преобразования прототипа преобразователя для получения новой конструкции. Как было показано выше, в области ТПТТ при разработке новых конструкций, основными приемами усовершенствования существующих конструкций-прототипов являются следующие приемы: совмещение функций элементов, разделение функций элементов, изменение формы элементов, введение дополнительных элементов, изменение взаимного расположения элементов, использование аналогичного принципа построения и другие.

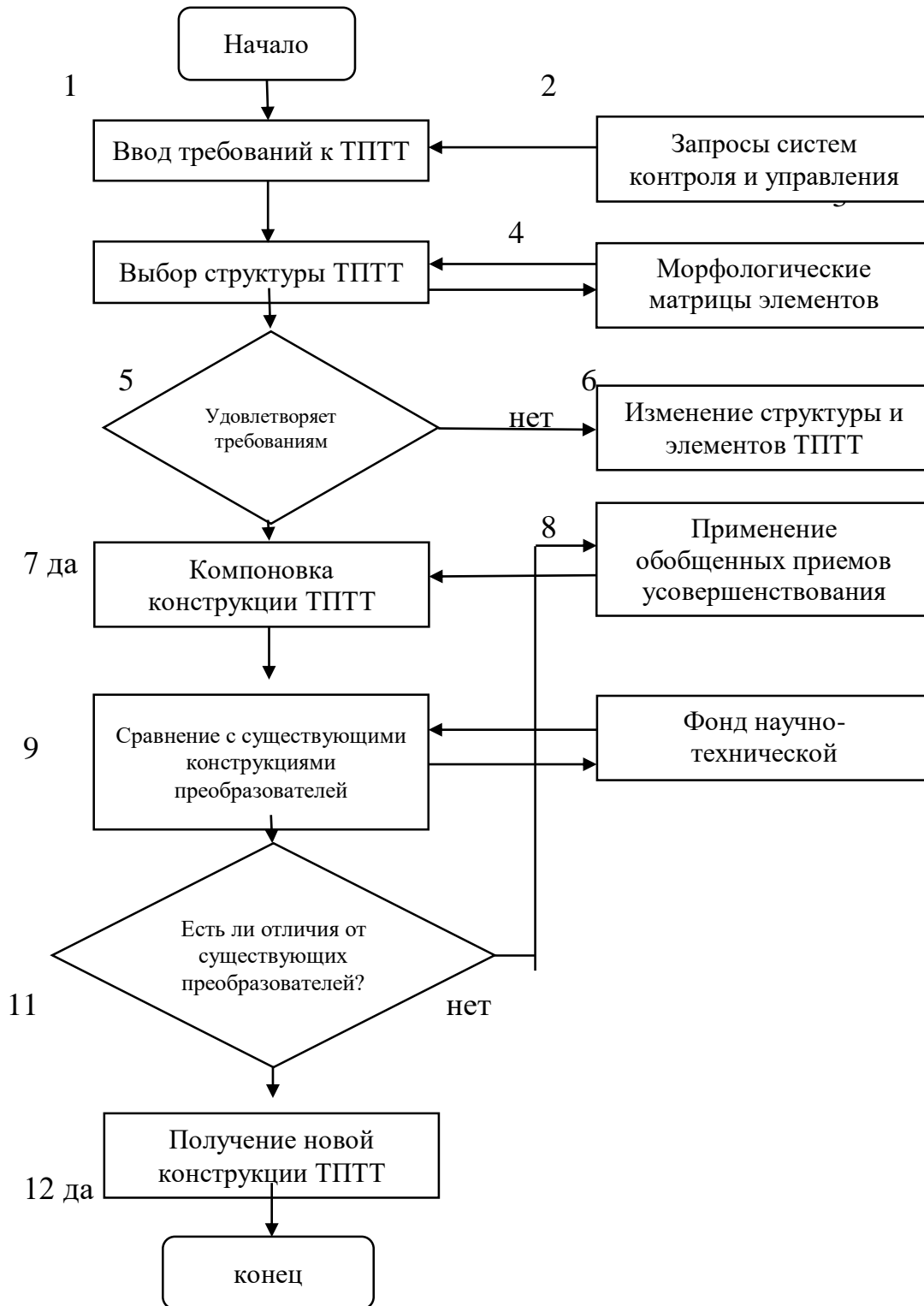


Рис. 4.2. Блок-схема алгоритма выбора структуры ТПТТ

4.3 Выбор основных элементов ТПТТ

4.3.1 Выбор теплопроводов ТПТТ

Основные требования к теплопроводу: высокая точность геометрических размеров (диаметр, длина, толщина стенки), высокое качество материалов с точки зрения теплопроводности и чистоты, надежность при механических воздействиях (растяжение, сжатие, вибрация и другие). На основе морфологической таблицы М.1 выбирают структуру, а материал для теплопровода выбирается с учетом эксплуатационных и конструктивных характеристик конкретного ТПТТ. При этом, как было указано выше, необходимо учитывать теплопроводность, устойчивость к воздействию агрессивного или влажного газа, плотность, термическое расширение, теплоемкость, а также стоимость, возможность обработки и взаимозаменяемости. В качестве материала теплопровода в конструкциях ТПТТ без дополнительного нагревательного элемента выступает материал термочувствительного элемента, а в конструкциях ТПТС капсулами в ⁰ качестве материала, обладающего большой теплопроводностью, наиболее целесообразно использовать медь, латунь и алюминий. В качестве материалов обладающих низкой теплопроводностью целесообразно использовать пластмассу, кварц, стекло.

4.3.2 Выбор нагревательных элементов.

Выбор структуры нагревательного элемента (источника тепла) приведен в морфологической таблице М.4. В качестве нагревательных элементов ТПТТ в основном используются электрические нагревательные элементы из металлических проводов и пленок, с помощью которых можно точно задавать мощность нагрева.

Основные требования к нагревательным элементам: высокая точность задаваемой мощности нагрева, надежность, воспроизводимость характеристик, малые габариты, малая масса, удобство и технологичность расположения на поверхности термочувствительного элемента, технологичность подсоединения соединительных проводов, а также доступная цена. Важным требованием к нагревательным элементам (а именно к источникам тепла в данных ТПТТ) является

обеспечение условия равномерного и постоянного удельного теплового потока ($d(x) = \text{const}$) на поверхности теплопровода (цилиндрического полупроводникового термосопротивления), что соответствует полученным математическим моделям (глава II) и обеспечивает высокую чувствительность и точность ТГТТТ. Следует сказать, что при полупроводниковых термосопротивлениях с током самоподогрева очень сложно обеспечить условие $d(x) = \text{const}$, так как в процессе измерения изменяется сопротивление полупроводникового термосопротивления и, следовательно, изменяется ток самоподогрева. Поэтому в конструкциях ТПТТ наиболее целесообразно использовать полупроводниковые термосопротивления с дополнительным нагревательным элементом. В качестве дополнительных нагревательных элементов наиболее пригодными являются тонкие (диаметр $(0,01-0,05)$ мм) нихромовые, манганиновые и константановые провода в эмалевой изоляции равномерно намотанные на тело цилиндрического полупроводникового термосопротивления. Как было показано в морфологических таблицах М.4, в качестве нагревательных элементов пригодны и тонкие металлические и полупроводниковые пленки, наносимые по специальной технологии на тело цилиндрических полупроводниковых термосопротивлений. Кроме указанных выше требований нагревательные элементы должны иметь стабильный источник питания, высокий срок службы и низкую стоимость.

4.3.3 Выбор термочувствительных элементов ТПТТ

Основные требования к термочувствительным элементам: высокая чувствительность, высокое быстродействие, удобство и эффективность установки в конструкции с нагревательным элементом, малые габариты масса и цена.

В морфологической матрице М.2 приведены основные типы структур термочувствительных элементов, которые были описаны выше. В целом формы термочувствительных элементов могут быть сосредоточенные (это термоэлектрические термометры, полупроводниковые бусинковые термометры сопротивления и другие) и распределенные (тонкая металлическая нить, полупроводниковые термосопротивления в виде цилиндрического тела и обмотка

из металлического термометра сопротивления). Как было указано выше для создания многофункциональных тепловых преобразователей термоанемометрического типа наиболее пригодны полупроводниковые термометры сопротивления цилиндрической формы, которые имеют высокую чувствительность, малые габариты и высокое быстродействие, а цилиндрическая форма тела термометра сопротивления весьма удобна для расположения на ней нагревательного элемента из тонких нихромовых, манганиновых или Константиновых проводов, а также тонких металлических или полупроводниковых пленок.

4.3.4 Выбор измерительных схем и микропроцессорных устройств ТПТТ

Среда измерительных схем ТПТТ как показано в главе III наиболее распространенными являются делительные и мостовые измерительные схемы. В измерительных схемах происходит предварительная обработка сигналов о параметрах потока газа. При этом входные сигналы ТПТТ могут содержать наряду с полезными сигналами и неинформативные сигнала (помехи), которые искажают измерительную информацию и являются источником погрешностей. Поэтому выходные сигнала ТПТТ необходимо тщательно обработать, используя ряд современных средств: фильтрация, сглаживание, линеаризация и другие.

С учетом наличия нескольких контролируемых параметров потока газа (скорость, расход, направление и температура) необходимым является применение микропроцессорных измерительных систем для обработки сигналов ТПТТ и повышение точности контроля. Использование микропроцессоров в комплекте с ТПТТ дает возможность проводить калибровку, испытание и поверку, коррекцию нелинейности и температурную компенсацию, преобразование и обработку измерительной информации.

Основные требования к микропроцессорным устройствам следующие: максимальная тактовая частота, ПЗУ/ППЗУ, ОЗУ, таймеры, линии ввода/вывода, цена. В ТПТТ наиболее предпочтительными оказались микропроцессорные

устройства типов АТ89S8252 и АТ89,551.

4.4 Параметрическое проектирование ТПТТ

4.4.1 Общие вопросы параметрического проектирования ТПТТ

Главной задачей параметрического проектирования приборов и преобразователей на основе ТПТТ является получение их основных характеристик, удовлетворяющих поставленным требованиям и наилучших с точки зрения принятого критерия оптимизации. Одной из трудностей при проектировании приборов на основе ТПТТ является выбор критерия оптимальности, *I*. Обычно исходными данными при проектировании прибора являются диапазон преобразований $X [X_{\min}, X_{\max}]$, параметры источника питания, параметры окружающей среды и другие. В результате оптимального параметрического проектирования необходимо найти оптимальные $l_{0\text{ опт}}, D_{0\text{ опт}}, D_{1\text{ опт}}, p_{1\text{ опт}}, p_{2\text{ опт}}, L_{1\text{ опт}}$, которые в общем случае составляют параметры ТПТТ.

$$\bar{a} = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, \dots, a_n\} \quad (4.1)$$

В результате оптимизации необходимо найти такие параметры ТПТТ, при которых достигается оптимальное значение критерия оптимальности $I(\bar{a})$, т.е.

$$I(\bar{a}) = \text{opt} I(\bar{a}), \quad \bar{a} \in D\bar{a}, \quad (4.2)$$

где $\text{opt} I(\bar{a})$ - оптимальное значение $I(\bar{a})$,

$D\bar{a}$ - область допустимых решений.

Если обозначить Π - область поиска, то

$$\Pi \{ \bar{a} : b_i \leq a_i \leq c_i, i=1, n \} \quad (4.3)$$

где b и c - минимальные и максимальные значения a .

В процессе проектирования необходимо учитывать, что ТПТТ выполняет свои функции и остается исправным только при условии, что входная величина $X_{вх}$ не выходит из диапазона измерений, т.е.

$X_{вх} \in (X_{мин}, X_{макс})$, где $X_{мин}$, $X_{макс}$ - минимальные и максимальные значения входной величины.

Для поиска оптимальных параметров используются математические модели ТПТТ. Анализ данных математических моделей показывает, что они, во-первых, информативны, во-вторых, адекватны реальным процессам преобразования (экспериментальные данные приведенные в главе 2 хорошо подтверждают адекватность математических моделей), в-третьих, выходные величины и параметры математических моделей достаточно точно отражают связь варьируемых параметров с входными воздействиями, в-четвертых, данные математические модели достаточно просты и легко реализуются на ПЭВМ.

Все вышеизложенное свидетельствует о том, что данные математические модели удовлетворяют требованиям к математическим моделям, используемым для оптимального проектирования. Наибольшее число задач проектирования приборов на основе ТПТТ связано с увеличением чувствительности, повышением точности, получением линеаризованной статической характеристики, повышением надежности и расширением диапазона. В связи с этим рассмотрим некоторые задачи оптимального проектирования приборов на основе ТПТТ по критериям: максимум чувствительности, линейности статической характеристики и точности.

4.4.2. Формализация задачи проектирования ТПТТ по критерию чувствительности и линейности статической характеристики.

Задача проектирования приборов по критерию чувствительности и линейности статической характеристики формулируется следующим образом. Выбрана структура и, следовательно, определена статическая характеристика, например, в виде

$$\mathbf{u}_{\text{ВЫХ}} = \mathbf{u}_M \frac{K \cdot \Delta R}{(K+1)^2 \cdot R}; \quad (4.4)$$

В общем случае статическую характеристику (4) можно представить в виде

$$\mathbf{u}_{\text{ВЫХ}} = \mathbf{f}[\mathbf{X}_{\text{ВХ}}, \bar{\mathbf{a}}(\bar{\mathbf{y}})], \mathbf{X}_{\text{ВХ}} \in \mathbf{X}_{\text{ВХМИН}} \mathbf{X}_{\text{ВХМАКС}}, \bar{\mathbf{a}}(\bar{\mathbf{y}}) \in \mathbf{D}\bar{\mathbf{a}}, \quad (4.5)$$

где: $\bar{\mathbf{a}} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ - вектор варьируемых параметров;

$\bar{\mathbf{y}} = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ вектор влияющих параметров;

n - число варьируемых параметров;

m - число влияющих параметров.

В результате оптимального проектирования требуется найти оптимальный вектор параметров $\bar{\mathbf{a}}(\bar{\mathbf{y}}) \in \mathbf{D}\bar{\mathbf{a}}$ так, чтобы

$$I[\bar{\mathbf{a}}(\bar{\mathbf{y}})] = \text{ont} I[\bar{\mathbf{a}}(\bar{\mathbf{y}}), \mathbf{X}_{\text{ВХ}}], \mathbf{D}\bar{\mathbf{a}} = \{ \bar{\mathbf{a}} : b_i \leq a_i \leq c_i, a_i \geq 0, i = \overline{1, n} \} \quad (4.6)$$

Задача повышения линейности статической характеристики решается путем аппроксимации реальной нелинейной статической характеристики преобразователя линейной зависимостью

$$\mathbf{u}_{\text{ВЫХЛ}} = \mathbf{A} * \mathbf{X}_{\text{ВХ}} + \mathbf{B} \quad (4.7)$$

Используя квадратичный интегральный критерий близости функций, имеем

$$\text{Мин} I = \int_{\mathbf{X}_{\text{ВХМИН}}}^{\mathbf{X}_{\text{ВХМАКС}}} \{ \mathbf{u}_{\text{ВЫХЛ}}(\mathbf{X}_{\text{ВХ}}) - \mathbf{A} * \mathbf{X}_{\text{ВХ}} - \mathbf{B} \} d\mathbf{X}_{\text{ВХ}} \quad (4.8)$$

ИЛИ

$$\text{Мин} I = \int_{X_{\text{ВХМИН}}}^{X_{\text{ВХМАКС}}} \{f(X_{\text{ВХ}}, \bar{a}(\bar{y})) - A * X_{\text{ВХ}} - B\} dX_{\text{ВХ}} \quad (4.9)$$

Решив задачу, находят значения $A = A[X_a, \bar{a}(\bar{y})]$, $B = B[X_{ex}, \bar{a}(\bar{y})]$, $\bar{a} \in D \bar{a}$ и параметры $\{\bar{a}\}$, при которых реализуются эти коэффициенты. Задача обеспечения высокой чувствительности легко решается после задачи обеспечения высокой линейности статической характеристики, так как эти задачи очень тесно связаны. Для решения задачи повышенной чувствительности необходимо определить оптимальные значения вектора $\bar{a}(\bar{y}) = a(\bar{y})$, которые обеспечивают

$$\text{Макс} A[X_{\text{ВХ}} \bar{a}], \bar{a} \in D \bar{a}, X_{\text{ВХ}} \in X_{\text{ВХМИН}} X_{\text{ВХМАКС}}, \quad (4.10)$$

4.4.3. Формализация задачи проектирования по критериям точности и быстродействия.

Точность ТПТТ определяется наиболее полно на основе энтропийной погрешности Δ , и задача оптимального параметрического проектирования по критерию точности может быть решена путем нахождения оптимального вектора параметров $a = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ так, чтобы для

$$I[X_{\text{ВХ}}, \bar{a}(\bar{y})] = \text{мин} \Delta \varepsilon[X_{\text{ВХ}}, \bar{a}(\bar{y})], X_{\text{ВХ}} \in (X_{\text{ВХМИН}}, X_{\text{ВХМАКС}}), \bar{a} \in D \bar{a} \quad (4.11)$$

Быстродействие прибора определяется динамическими характеристиками этих приборов и основным показателем быстродействия и инерции является постоянная времени T . На основании постоянных времени отдельных элементов можно оценить постоянную времени всего прибора $T_{\text{пр}}$. $T_{\text{пр}}$ можно также получить на основании аппроксимации кривых переходного процесса, полученных теоретически или экспериментально. Проектирование по критерию быстродействия можно свести к задаче нахождения минимума постоянной времени

$T_{пр}$

$$I[X_{вх}, \bar{a}(\bar{y})] = \min T_{пр}, [X_{вх}, \bar{a}(\bar{y})], X_{вх} \in (X_{вх\text{мин}}, X_{вх\text{макс}}), \bar{a} \in D\bar{a} \quad (4.12)$$

Расчет и выбор оптимальных параметров ТПТТ выполняется по алгоритму, приведенному на рис. 4.3.

После общей методики структурного проектирования осуществляется переход к поэтапной схеме расчета и параметрического проектирования. Рассмотрим кратко основные этапы алгоритма, приведенного на рис. 4.3.

В модуле 1 производится подготовка массива исходных данных на основании требований со стороны систем контроля и управления.

В модуле 2 осуществляется расчет распределения и достигается заданное распределение с помощью модулей 3 и 4.

В модуле 5 осуществляется расчет параметров полупроводникового термометра сопротивления и измерительной схемы, результаты которого используются для формирования критерия оптимизации, ограничений и выбора метода поиска оптимума.

В модуле 6 осуществляется выбор критериев оптимизации.

В модуле 7 осуществляется выбор начальных приближений по варьируемым параметрам $\bar{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$.

В модуле 8 осуществляется определение области поиска 77.

В модуле 9 осуществляется проверка на принадлежность начальных приближений a области допустимых значений a .

В модуле 10 осуществляется выбор метода параметрической оптимизации.

В модуле 11 осуществляется проверка на многоэкстремальность исходной задачи.

В модуле 12 осуществляется проверка принадлежности оптимального решения в области поиска.

В модуле 13 осуществляется вывод расчетных данных и параметров оптимизации (в виде таблиц или графиков).

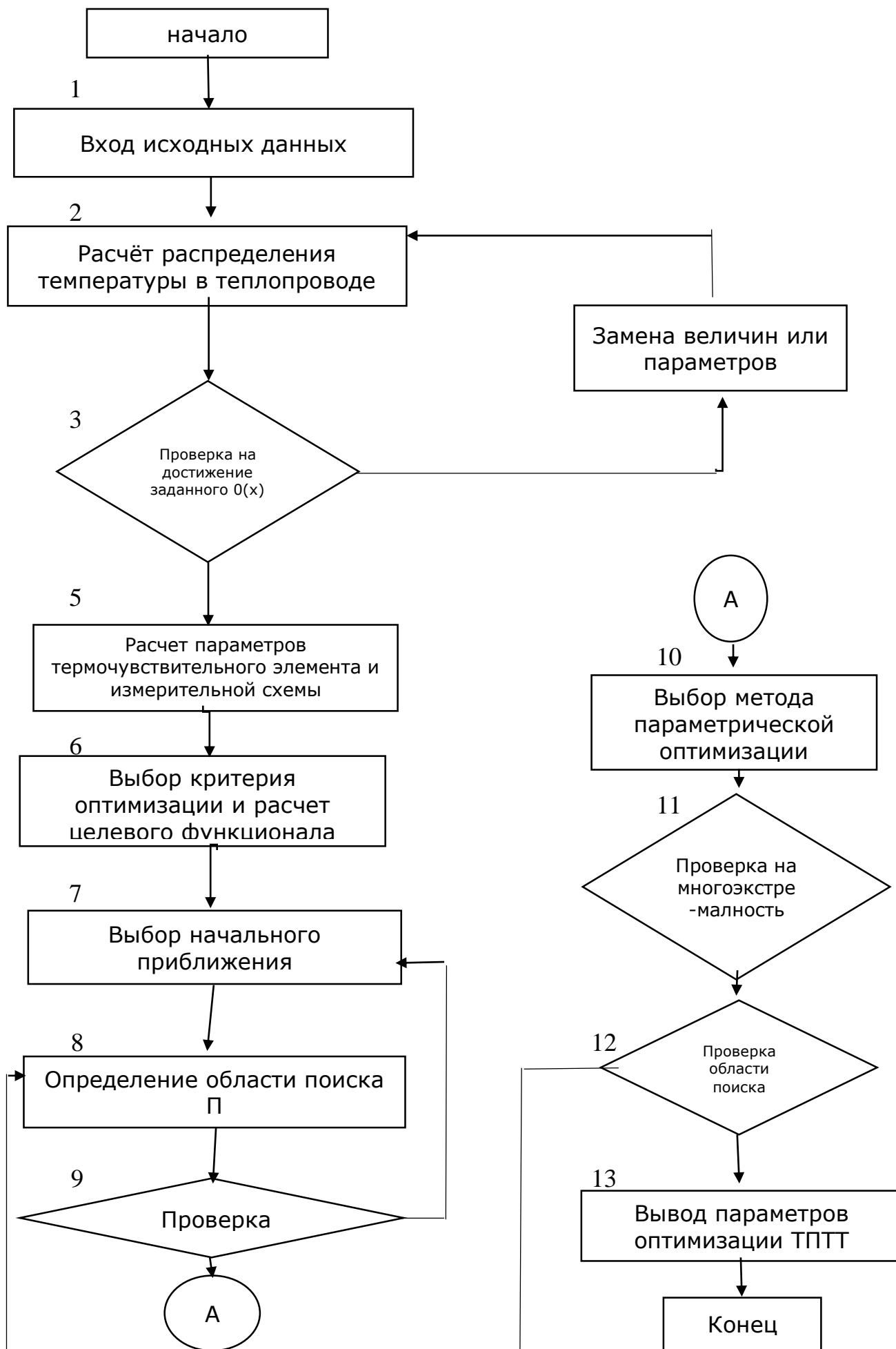


Рис. 4.3. Блок-схема алгоритма расчета и оптимизации ТГТТТ.

4.5. Примеры практического применения ТПТТ для систем контроля параметров потоков жидкостей и газов.

В главах II и III были рассмотрены математические модели и основные характеристики ТПТТ. Было показано, что структура ТПТТ с дополнительным нагревательным элементом имеет высокие чувствительность, надёжность и быстродействие и на этой основе были разработаны многофункциональные тепловые преобразователи термоанемометрического типа, позволяющие контролировать такие параметры потоков жидкости и газа как скорость, расход, температура, направление и наличие потока. Многофункциональный тепловой преобразователь, а также приборы на его основе были разработаны для применения в различных трубопроводах с потоками воздуха и в системах промышленной вентиляции.

В связи с актуальностью контроля малых расходов воздуха в аспирационных системах, в системах контроля задымления производственных помещений, в топливноэнергетических и научно-исследовательских установках был разработан микропроцессорный прибор для контроля температуры, скорости, расхода и наличия потоков воздуха в трубопроводах на основе ТПТТ.

На рис. 4.4 показана конструктивная схема преобразователя прибора, которая может быть изготовлена на основе металлической или стеклянной трубки 1, внутри которой симметрично устанавливаются основной полупроводниковый термометр сопротивления 2 с нагревательным элементом 4 и дополнительный полупроводниковый термометр сопротивления 3, выводы которых подсоединяются к штепсельному разъёму 5, укрепленный на наружной поверхности корпуса 6. Для герметизации соединений трубки 1 с основным трубопроводом 8 используются ниппельные соединения 7 типа конус-конус.

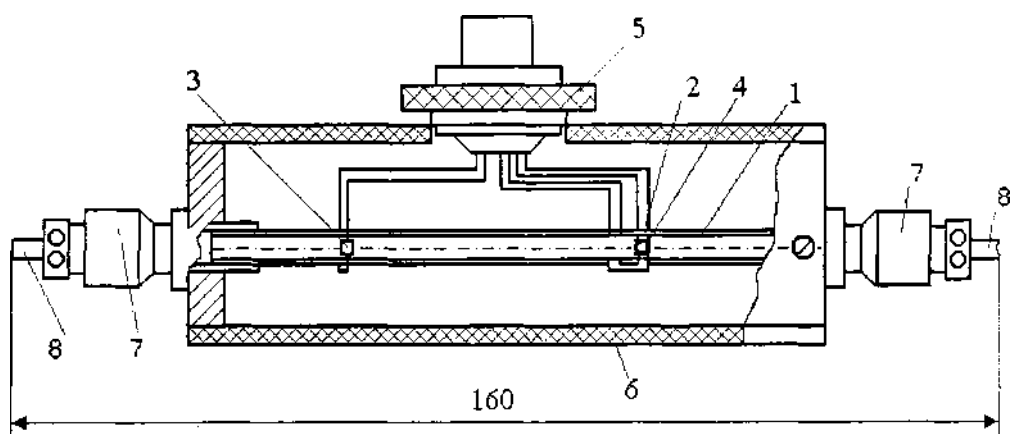


Рис. 4.4. Конструкция трубчатого преобразователя расхода жидкости и газа на основе ТПТТ: 1 – трубка преобразователя; 2,3 – основной и компенсационный полупроводниковые термометры сопротивления; 4 –нагревательный элемент; 5 – штепсельный разъём; 6 – корпус преобразователя; 7 – ниппельные соединения типа конус-конус; 8 – внешний трубопровод.

Технические характеристики многофункционального трубчатого преобразователя расхода газа на основе ТПТТ:

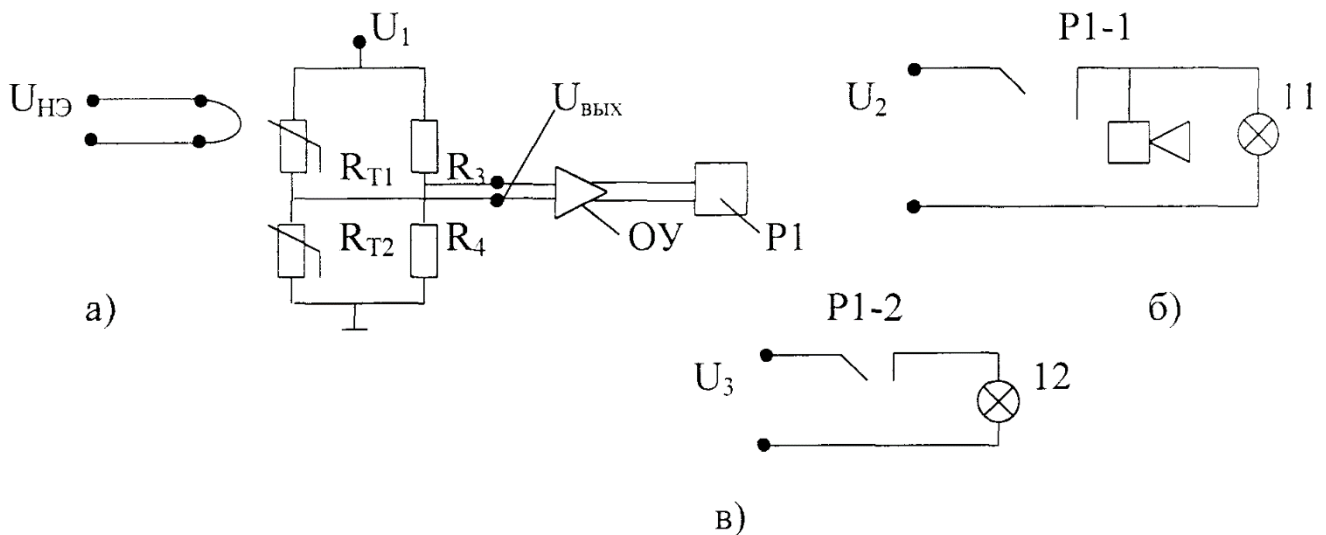
1. Диапазон измеряемых расходов газа, л/ч	0-160
2. Диаметр трубки преобразователя, мм	10,0
3. Погрешность измерения, %	1,0
4. Диапазон измерений температуры, °С	0-100
5. Габаритные размеры преобразователя:	
- длина, мм	160
- высота, мм	80
- ширина, мм	55
6. Питание в сети, В	220
7. Сопротивление нагревательного элемента, Ом	26,5
8. Температура окружающей среды, °С	15-35

Описанный выше преобразователь расходов воздуха в трубопроводах как указывалось выше весьма эффективен для применения в аспирационных системах. Например, в портативных пробоотборниках проб воздуха из контролируемой зоны

в течении заданного промежутка времени с установленным расходом отбирают пробу для анализа допустимой концентрации загрязнения (АК) производственных помещений. До настоящего времени многие пробоотборники снабжаются такими расходомерами как, ротаметры и электронно-счетные на основе турбинных преобразователей. Указанные расходомеры воздуха имеют точность измерения расхода до 5 %. Применение ТПТТ в портативных аспирационных пробоотборниках может существенно повысить точность определения ДК загрязнения производственных помещений.

Весьма перспективно применение ТПТТ в аспирационных системах пожарных извещателей для сверхраннего обнаружения возгорания в крупных объектах с массовым скоплением людей: торговых и развлекательных центрах, выставочных павильонах, театрах, кинотеатрах и т. п. На этих объектах в защищаемых помещениях устанавливаются трубы с отверстиями для забора воздуха и аспирационные устройства с турбиной для обеспечения потока воздуха. В указанных объектах крайне важно достоверно обнаружить и ликвидировать очаг на самой ранней стадии развития, на этапе тления задолго до появления открытого огня, либо при возникновении перегрева отдельных компонентов электронных устройств. Именно преобразователи на основе ТПТТ позволяют одновременно точно контролировать температуру воздуха, скорость, а также вообще наличие потока воздуха, т.к. при остановке воздушного насоса или при засорении труб с воздухом вся система аспирационных пожарных извещателей перестает функционировать. Именно отказ в потоке воздуха может точно обнаружить преобразователь на основе ТПТТ. Описанная выше конструкция преобразователя на основе ТПТТ весьма эффективна и для контроля малых скоростей и расходов жидкостей в трубопроводах.

В главе III было указано, что в мостовой измерительной схеме ТПТТ при отсутствии потока жидкости или газа ($C_T=0$) или при минимальном расходе ($C_T=C_{T\min}$) мостовая схема уравнивается (рис. 4.8) и в этом случае $R_{T1} = R_{T2} = R_{T3} = R_{T4}$ и $U_{\text{вых}}=0$



- а) измерительная схема;
- б) цепь звуковой сигнализации;
- в) цепь сигнала о наличии потока воздуха.

Рис. 4.5. Измерительная схема ТПТТ для контроля наличия потока воздуха в трубопроводе.

Это условие выполняется путем подбора полупроводникового термосопротивления R_{T1} таким образом, чтобы $C_T=0$ и включенном нагревательном элементе его сопротивление R_{T1} было равно сопротивлениям других плеч мостовой схемы: R_{T2} , R_{T3} , R_{T4} . Именно этот режим ТПТТ позволяет точно контролировать отсутствие потока воздуха в трубопроводе путем включения на выходе измерительной схемы операционного усилителя ОУ (рис. 4.5) и промежуточного реле P1, который при отсутствии напряжения ($U_{\text{ВЫХ}}=0$) своим нормально замкнутым контактным P1-1 включает цепи звуковой ЗС и световой сигнализации 1 об отсутствии потока (рис. 4.5, б). При наличии потока воздуха мостовая схема выходит из равновесия ($U_{\text{ВЫХ}} \neq 0$), реле P1 включается и своим нормально открытым контактом P1-2 включает оптический сигнал 2 о наличии потока воздуха в трубопроводе.

Конструкция прибора на основе ТПТТ (рис. 4.6) для применения в системе вентиляции представляет собой зонд 1, в основании 2 которого выполнен цилиндрический канал 3. В канале 3 установлен ТПТТ, который состоит из полупроводникового терморезистора 5 с намотанным на него нагревательным элементом 7. С противоположной стороны, по направлению потока, установлен другой ТПТТ, имеющий соответственно полупроводниковый терморезистор 6 с нагревательным элементом 8. В средней части клинообразного выреза канала 3 на оси 9 расположен поворотный стержень 4, на нижней части которого укреплен диск-экран 10, а на верхней части укреплен круглый светоотражающий диск 11, который устанавливается напротив оптоэлектронных преобразователей в виде кольцевого фоторезистора 12 с источником излучения 13 в центре кольца или напротив фоторезистора 14 с источником излучения 15 в зависимости от направления потока газа, при этом оптоэлектронные преобразователи расположены в корпусе 2 на крайних точках поворота светоотражающего диска 11.

Измерительная схема ТПТТ состоит из двух мостовых измерительных схем (рис. 4.7), в плечи которых включены терморезисторы 5 и 6, а в другие плечи включены постоянные резисторы 17, 18, 19, 20, 21, 22. Выходы мостовых схем через операционные усилители У3 и У4 и аналого-цифровые преобразователи АЦП-1 и АЦП-2 подключены к входу микропроцессора МП.

Дополнительно прибор содержит цепи сигнализации, состоящие из двух делителей напряжения (рис 4.8) и двух схем сигнализации направления потока (рис. 4.9).

В плечи делителей напряжения (рис. 4.8) включены кольцевые фоторезисторы 12 и 14 с постоянными резисторами 25 и 26. Выходы делителей напряжения через электронные усилители У3 и У4 подключены к входам реле Р1 и Р2. Нормально замкнутые контакты реле Р₁₁, Р₁₂, Р₂₁, Р₂₂ включены в цепи нагревательных элементов соответственно 7 и 8 и индикаторов направления потока 27 и 28.

Многофункциональный преобразователь параметров потока жидкости и газа работает следующим образом.

В исходном состоянии при отсутствии потока ($G=0$) заслонка 10 находится в положении «а», светоотражающий диск 11 находится также на нейтральном положении и не отражает световые потоки Φ_1 и Φ_2 от источников излучения 13 и 15 в кольцевые приемники излучения 12 и 14, что обуславливает низкие напряжения на выходе усилителей напряжения и отключение реле Р1 и Р2, что в свою очередь обуславливает отключение нагревательных элементов 7 и 8 и индикаторных элементов 27, 28. Это положение сигнализирует об отсутствии потока газа (воздуха).

При наличии потока, например, в направлении указанном стрелкой под давлением напора заслонка 10 отклоняется в сторону потока в положении «б», тем самым перекрывает доступ газа, где расположены терморезистор 6 и нагревательный элемент 8. Нагревательный элемент 8. Нагревательный элемент 7 терморезистора 5 включен благодаря нормально открытому контакту Р₁₁ от делительной схемы с фоторезистором 12, на который падают отраженные лучи от диска 11 от источника излучения 13. Мостовая схема с терморезистором 5 на выходе формирует сигнал $U_{\text{вых1}}$ несущий информацию о скорости потока. Этот сигнал через усилитель У3 далее АЦП-1 поступает на микропроцессор МП. Одновременно и на индикаторе 27 и в МП отображаются сигналы о направлении потока (\rightarrow). В это время второй измерительный мост с терморезисторами 6 с отключенным нагревательным элементом 8 из-за нормально открытого контакта Р₂₁ работает в режиме измерения температуры потока с помощью терморезистора 6.

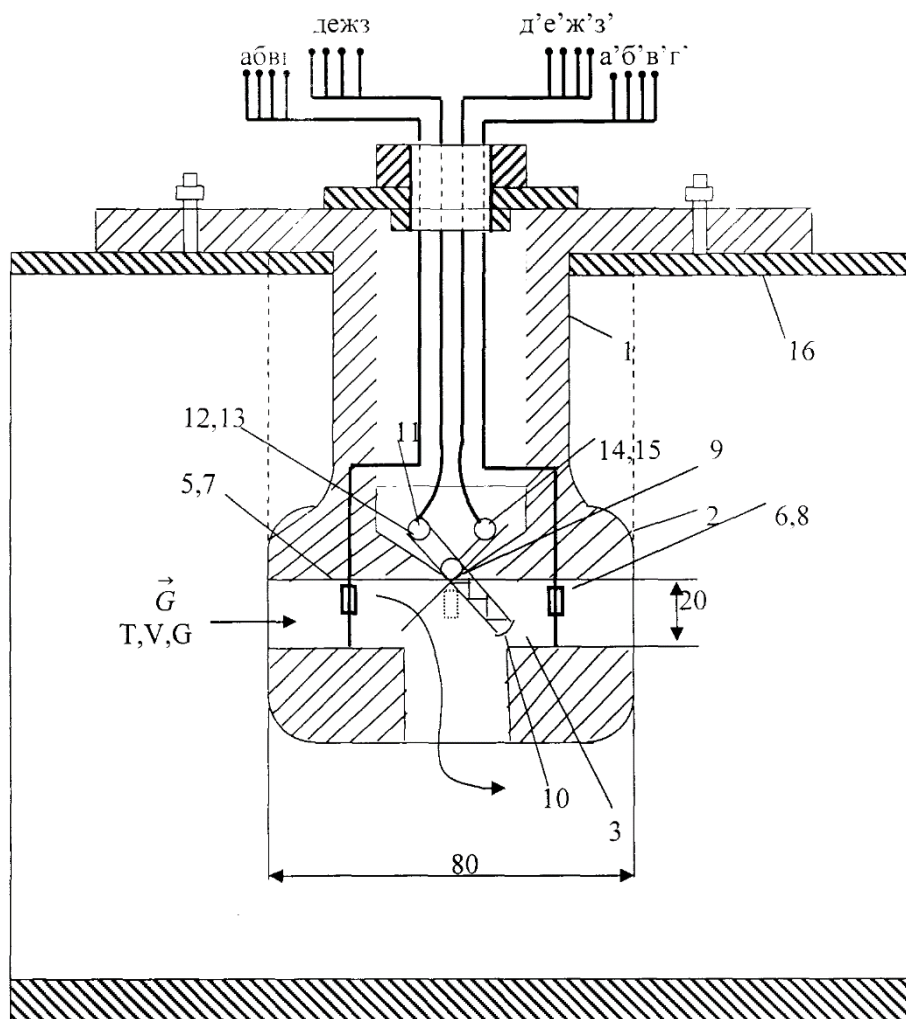


Рис. 4.6. Конструкция прибора на основе ТПТТ для ввода в трубопроводы: 1 – трубка (зонд); 2 – основание зонда; 3 – Т-образный канал; 4- поворотный стержень; 5,6 – полупроводниковые терморезисторы; 7,8 – нагревательные элементы; 9 – ось поворотного стержня; 10 – диск-экран; 11 – светоотражающий диск; 12,14 – кольцевые фоторезисторы; 13,15 – источники излучения (лампочки); 16 – трубопроводы системы вентиляции помещений; 17 – прокладка.

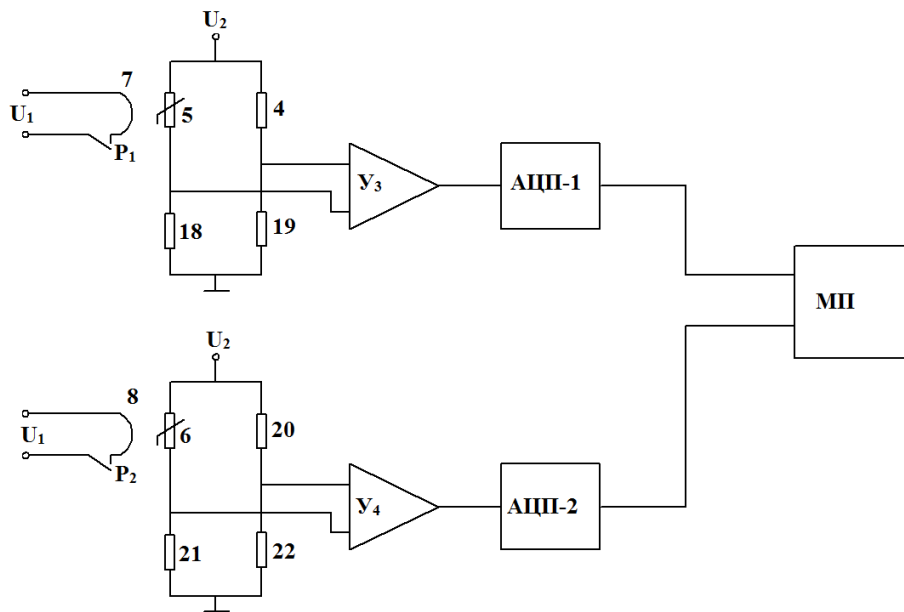


Рис. 4.7 Измерительная схема преобразователя на основе ТПТТ

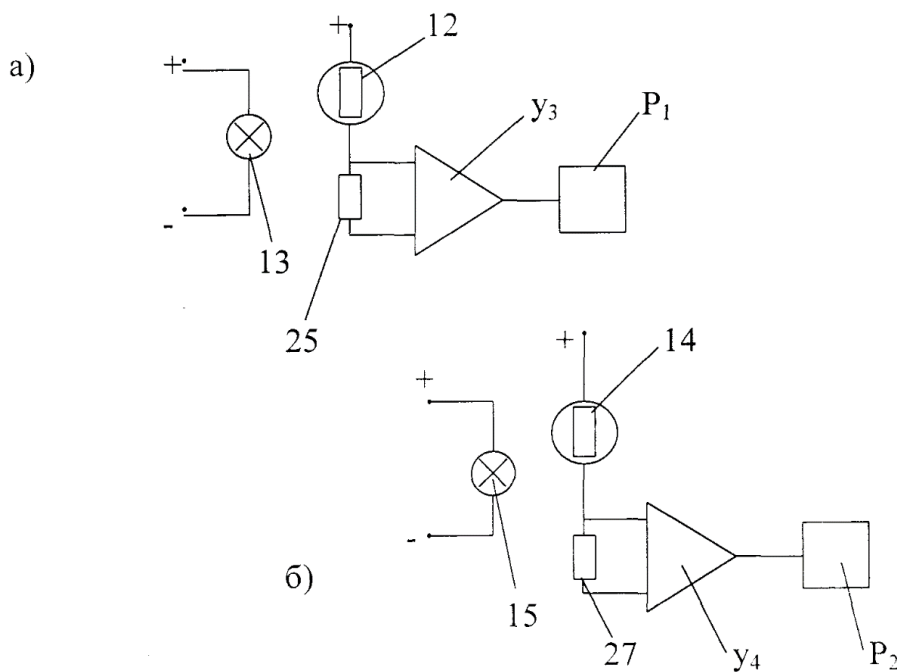


Рис. 4.8 Схема цепей оптоэлектронных элементов и промежуточных реле P_1 и P_2 .

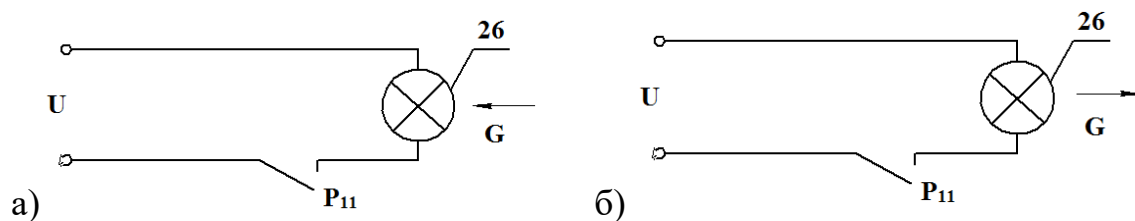


Рис. 4.9 Схема сигнализации направления потоков: а – слева на право, б – справа на лево.

Контроль расхода газа или жидкости в трубопроводе 16 осуществляется в микропроцессоре МП на основе вычисления расхода G при известной скорости потока V

$$G = v \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4.13)$$

где G – расход, v – скорость, D – диаметр трубопровода, $\pi \approx 3,14$.

При измерении направления потока газа или жидкости заслонка 10 оказывается в положении «с», включается нагревательный элемент 8 резистора 6 и второй мост будет выдавать информацию о скорости и направлении потока, а первый мост с терморезистором 5 будет выдавать информацию о температуре потока.

Таким образом, благодаря переключению потока в канале 3 преобразователя и применения бесконтактных оптоэлектронных преобразователей на основе кольцевых фоторезисторов, и применении микропроцессора оказалось возможным с помощью одной конструкции преобразователя получать информацию о скорости, расходе, температуре, направлении потока, а также сигнал о наличии потока (при $G=0$). Кроме того, применение микропроцессора в данном преобразователе и при наличии информации о температуре потока позволяет корректировать погрешности в показаниях преобразователя от измерения температуры потока. На рис. 4.6 с помощью индексов а, б, в, г и а', б', в', г' показаны выводы термочувствительных и нагревательных элементов, а индексами д, е, ж, з и д', е', ж', з' выводы источников и приемников излучений.

В целом принцип действия данного прибора основан на преобразовании больших скоростей потока газа в малые в измерительном канале и их измерения с помощью ТПТТ. Для определения скорости и направления потока зондовый преобразователь (рис. 4.6) погружается в трубопровод по направлению радиуса на глубину $l = 0,24R$ в этом случае местная скорость потока равна средней скорости по сечению трубопровода. В зависимости от конструкции и геометрических

размеров связь между скоростью в трубопроводе потока газа $v_{\text{тп}}$ и скоростью в канале ТПТТ $v_{\text{тп}}$ выражается формулой

$$v_{\text{тп}} = k_T v_{\text{ТТТ}}, \quad (4.14)$$

На рис. 4.10 приведена структурная схема аналогового варианта схемы зондового преобразователя на основе ТПТТ, в которой выходы мостовых ТПТТ М1 и М2 подключены ко входам балансного усилителя БУ, выход которого соединен со входом двустороннего стрелочного прибора ПП (миллиамперметра). Как было описано выше зондовый преобразователь устанавливается в контролируемом потоке воздуха и в зависимости от направления потока включаются нагревательные элементы полупроводниковых термометров сопротивления 5 или 6 и выходной прибор показывает скорость и направление потока.

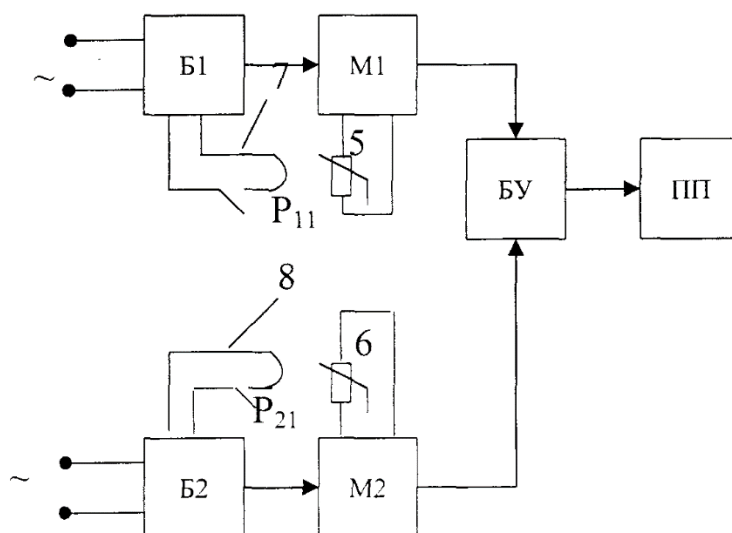


Рис. 4.10 Структурная схема аналогового зондового преобразователя на основе ТПТТ: Б1, Б2 – блоки питания; М1, М2 – мостовые измерительные схемы; БУ – балансный усилитель; ПП – показывающий прибор.

Данный прибор позволяет контролировать скорости $v_{\text{тп}}$ в трубопроводе в диапазоне $D=0-10\text{м/с}$.

Технические характеристики зондового преобразователя на основе ТПТТ:

1. Контролируемая среда – воздух;

2. Диапазон измерений скорости – $0,1 \div 10$ м/с;
3. Диапазон расходов при диаметре трубопровода $D_{\text{тр}}=500$ мм – $0 \div 100$ м³/с;
4. Погрешность преобразования – 1,0 %;
5. Потребляемая мощность – 10 Вт;
6. Напряжение питания
 - стационарного прибора – 220 В;
 - переносного прибора – 12 В;
7. Температура измеряемой среды – 20 ± 10 °С;
8. Масса преобразователя – 0,4 кг.

Устройства для контроля скорости и направления горизонтального ветра находят широкое применение в метеорологии, при контроле положения различных механизмов и машин, при строительстве и в других областях науки и техники.

Существующие устройства для контроля скорости и направления ветра состоят из следующих основных элементов: преобразователя скорости потока воздуха; преобразователя направления потока воздуха; измерительной схемы и индикаторного элемента для отображения результатов контроля скорости и направления ветра.

В качестве преобразователей скорости потока воздуха наиболее широкое применение получили анемометры, которые бывают конструктивно: крыльчатые и чашечные. Диапазон измеряемых скоростей составляет от 0,1 м/с до 10 м/с. Имеются конструкции и измерительные схемы анемометров, в которых с помощью индуктивных и оптоэлектронных преобразователей на выходе получают электрический сигнал.

Для одновременного контроля скорости и направления потока воздуха используется флюгер, на лобовой части которого установлена крыльчатка анемометра с [1,2].

Для контроля скорости воздушных потоков также широко используются термоанемометры, которые представляют собой термочувствительный элемент

(тонкая металлическая проволока или полупроводниковое термосопротивление) установленная между двумя жесткими держателями. Диапазон измеряемых скоростей термоанемометров составляет от 0 до 20 м/с.

Анализ существующих устройств для контроля направления ветра показывает, что наиболее эффективным является конструкция флюгера, угол поворота которого можно преобразовать в электрический выходной сигнал с помощью современных электрических (потенциометры), электромагнитных, оптоэлектронных и других преобразователей.

В таблице 1 приведены возможные варианты принципов построения устройств для контроля скорости и направления ветра на основе угла поворота флюгера φ .

Таблица 1.

Преобразователи угла поворота флюгера φ	Преобразователи скорости ветра V		
	Крыльчатые	Чашечные	Термоанемометрические
Электрический (потенциометр)	[65]	-	-
Электромагнитный	[66]	-	-
Оптоэлектронный	[63]	-	[68]

В устройстве на рис. 1 термоанемометрический преобразователь 2 представляет собой полупроводниковый терморезистор с нагревателем, включенный в мостовую измерительную схему, выходное напряжение которой несет информацию о скорости потока воздуха V . Оптоэлектронный преобразователь 3 углов поворота флюгера 4 в диапазоне 0-360 град. Выходные сигналы термоанемометрического преобразователя 2 и оптоэлектронного преобразователя через измерительные схемы, операционные усилители и аналого-цифровые преобразователя ко входу компьютера 6 и на экране компьютера 6 можно получить в векторной форме полное изображение направления в виде угле поворота φ и скорости ветра.

В вышеописанном устройстве [68] для контроля скорости и направления ветра в оптоэлектронном преобразователе 3 углов повороте флюгера используются четыре полукольцевых фоторезисторе, которые попарно соединены в два кольца, сдвинутых относительно друг друга на 90 градусов.

Основные характеристики и конструкция теплооптического устройства, состоящего из теплового преобразователя термоанемометрического типа для контроля скорости потока воздуха и оптоэлектронного преобразователя для определения направления потока воздуха в диапазоне 360 градусов.

В таких отраслях промышленности как тепло и ветроэнергетика, нефтегазовые комплексы, строительство высотных зданий, радио и телевизионные ретрансляторы, транспортные туннели, горно-рудные шахты и др, необходимо контролировать такие важные параметры воздушных потоков как скорость, температуру, направление, наличие или отсутствие воздушного потока.

Среди существующих устройств для контроля направления и скорости воздушных потоков недостаточно исследованы и разработаны устройства состоящие из тепловых преобразователей скорости воздуха и оптоэлектронного

преобразователя направления потока воздуха, которые имеют ряд существенных достоинств перед другими, такие как высокая чувствительность, надёжность, точность и простота технологии изготовления. Кроме того, современные системы контроля и управления воздушными потоками требуют, чтобы устройства контроля были многофункциональными и позволяли одной конструкцией контролировать скорость, температуру, направление и наличие потока воздуха, а также удобство сопряжения с микропроцессорными средствами.

Этим требованиям для контроля скорости воздуха наиболее полно удовлетворяют тепловые преобразователи термоанемометрического типа, которые имеют высокую чувствительность особенно при малых скоростях потоков. Функциональные возможности устройства повышаются путем одновременного измерения с помощью тепловых преобразователей скорости и температуры потока воздуха, а так же благодаря применению оптоэлектронного преобразователя контроля поворота флюгера декартовых координатах в диапазоне от 0 до 360 градусов.

На рис.1 – конструкция устройства для измерения скорости и направления горизонтального ветра; на рис.2-измерительная схема устройства; на рис.3 - представлены расположения верхнего приемника излучения и оптического экрана при различных направлениях ветра; а именно: на рис. 3 а, б, и с показаны расположения верхних и нижних приемников излучения при исходном направлении ветра в виде стрелки в векторной диаграмме на экране компьютера; на рис. 3 d, e, f – показаны расположения верхних и нижних приемников излучения и стрелки на экране компьютера при повороте от исходного направления ветра на 90 градусов против часовой стрелки; на рис. 3 g, h и i показаны расположения приемников излучения, экрана и стрелки при повороте направления ветра на 180 градусов от исходного; на рис. 3 j, k и l показаны расположения приемников излучения, экрана и стрелки при повороте направления ветра; на рис. 4. приведены статические характеристики теплового преобразователя.

Устройство для измерения скорости и направления ветра (рис.1, рис.2) состоит из корпуса 1, флюгера 2, стержня-оси 3, подшипников 4 и 4', медной трубки 5, в которую помещены основной 6 и дополнительный 7 терморезисторы и нагревательный элемент 8, кольцевого источника излучения 9, верхних полукольцевых приемников излучения 10,11 и смещенных на 90 градусов относительно них нижних полукольцевых приемников 12,13; верхнего 14 и нижнего 15 полудисковых оптических экранов (рис.3,4); постоянных электрических сопротивлений 16,17,18,19,20,21,22; переключателя 23; электронных усилителей 24,25,26, аналого-цифровых преобразователей 27,28,29; микропроцессора 30; штепсельного разъема 31; выводных проводов 32. На рисунках обозначены: U_m - напряжение питания подаваемое в мостовые схемы I, II, III; U_1, U_2, U_3 -выходные напряжения мостовых схем I, II и III

Устройство для измерения скорости и направления ветра работает следующим образом.

При наличии горизонтального ветра со скоростью V (рис.1) основной терморезистор 6 с нагревательным элементом 8 нагревается и благодаря медной трубке 5, обеспечивающей хороший тепловой контакт с окружающим воздухом вступает в теплообмен с потоком ветра и в зависимости от величины скорости потока V устанавливается определенный процесс теплообмена и его температура и следовательно электрическое сопротивление терморезистора 6.

В исходном состоянии при отсутствии скорости ветра ($V = 0$) мост I для измерения скорости ветра (рис.2) уравновешен ($U_1 = 0$) и при положении переключателя 23 в «а» сопротивления 6,7,16,17 равны между собой. При наличии скорости ветра ($V \neq 0$) терморезистор 6 в результате увеличения теплообмена охлаждается, температура его уменьшается и его сопротивление изменяется, при этом мост выходит из равновесия и его выходное напряжение U_1 дает информацию о скорости потока ветрам [$U_1 = f(v)$]. Далее сигнал о скорости ветра через 24 и 27 подается в микропроцессор 30.

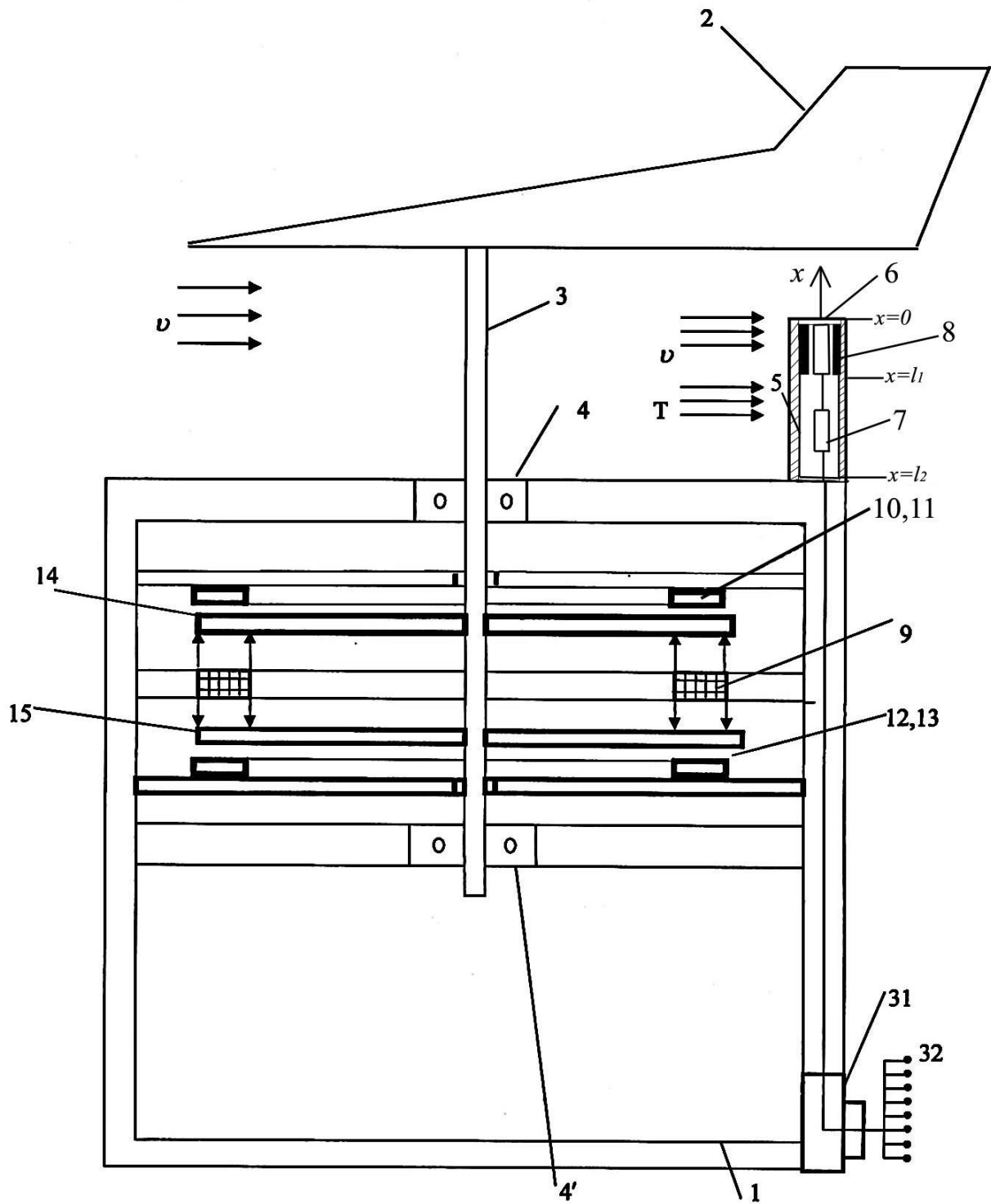


Рис.4.11. Конструкция теплооптического преобразователя для измерения скорости и направления горизонтального ветра.

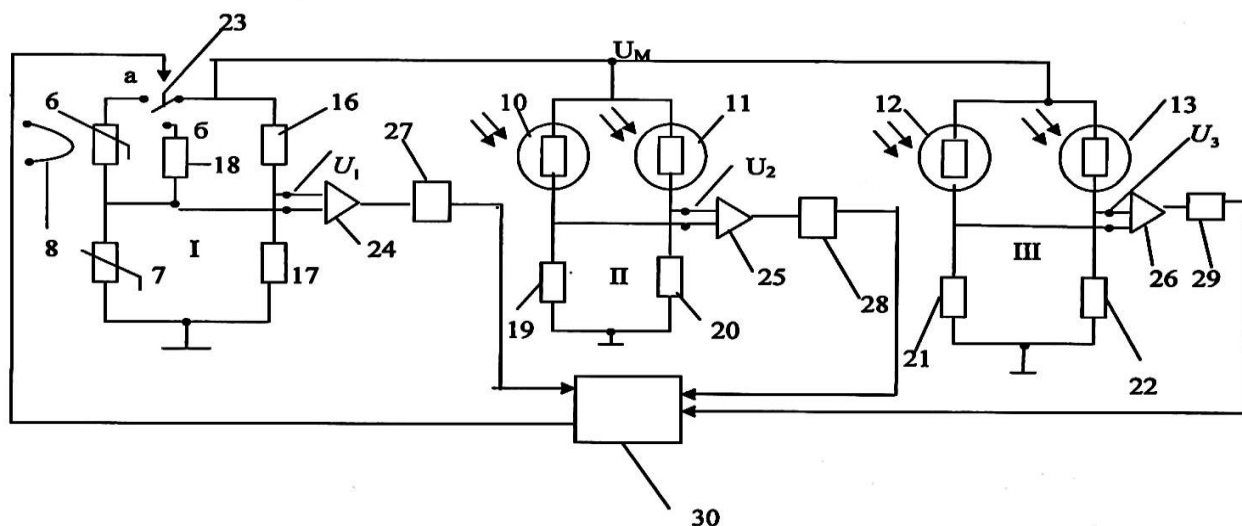


Рис.4.12. Измерительная схема теплооптического преобразователя для измерения скорости и направления горизонтального ветра.

Так как при изменении температуры изменяется и сопротивление терморезистора 6, то для компенсации этого изменения используется терморезистор 7, который реагирует только на температуру потока. Для измерения температуры потока сигнал от микропроцессора 30 через переключатель 23 в положении «б» подключает к мостовой измерительной схеме I постоянное сопротивление 18 и мостовая схема I с терморезистором 7 будет контролировать только температуру T потока ветра. Благодаря медной трубке 5 в которую помещены терморезисторы 6 и 7 и нагревательный элемент 8 обеспечивается хороший тепловой контакт с потоком воздуха и защищаются 6,7 и 8 от атмосферных осадков и других воздействий.

Таким образом, мостовая измерительная схема I с терморезисторами 6 и 7 и нагревательным элементом 8 позволяет благодаря переключателю 23 измерять скорость при положении контакта переключателя 23 «а» и температуру потока при положении контакта переключателя 23 «б». Далее в обоих случаях выходной сигнал U_1 , усиливается электронным усилителем 24 и через аналого-цифровой переключатель 27 подается на микропроцессор 30, в котором периодически получают информацию о скорости v и температуре T воздушного потока.

В исходном направлении горизонтального ветра флюгер 2 с осью 3 принимает положение как показано на рис. 4.11 и одновременно принимают соответствующие положения оптические полудисковые экраны 14 и 15, 3 а и в по отношению к полукольцевым фоторезисторам 10,11 и 12,13. В мостовой измерительной схеме II с полукольцевыми фоторезисторами 10 и 11 происходит одинаковое затемнение на половину их сопротивлений и при равенстве их сопротивлений другим сопротивлениям моста 19 и 20 выходное напряжение моста II будет равно нулю ($U_2 = 0$). А в другой мостовой схеме III (рис.4.12) с фоторезисторами 12 и 13 из-за полного затемнения фоторезистор 13 (его сопротивление будет максимальным) и полного освещения фоторезистора 12 (его сопротивление будет минимальным) и при равенстве сопротивлений других плеч 21 и 22 выходное напряжение моста U_3 будет иметь максимальное значение со знаком «+». Эти значения напряжений мостов U_2 и U_3 могут быть отображены на экране компьютера в виде векторной диаграммы как показано на рис.3с. Откладывая по осям U_2 и U_3 их значения (рис.4.13) мы получаем векторное изображение направления горизонтального ветра при данном положении флюгера 2. При изменении направления ветра, например, перемещаясь против часовой стрелки, флюгер 2 с помощью оси- стержня 3 повернет оптические экраны 14 и 15 и на выходе мостовых.

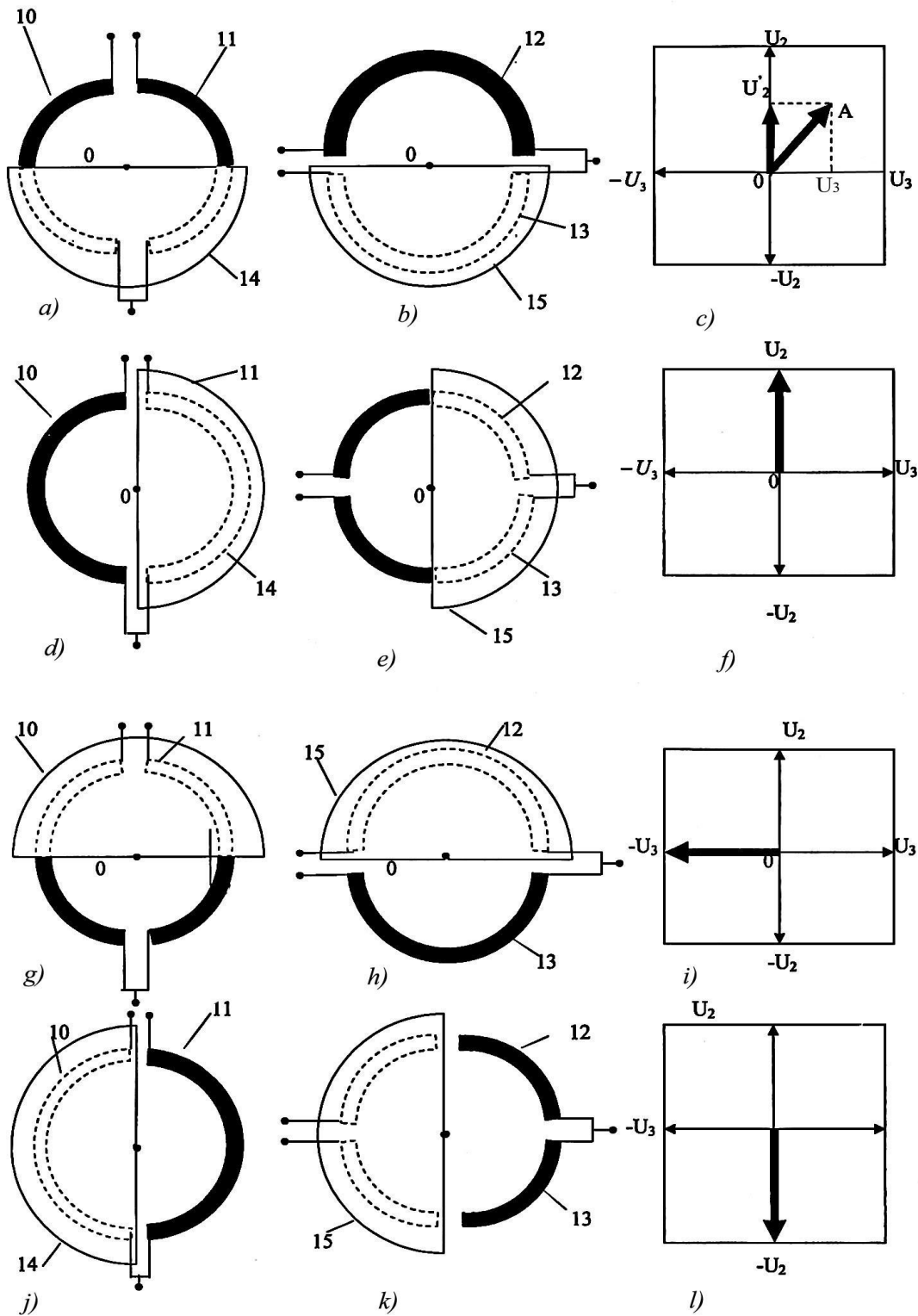


Рис.4.13. Схемы расположения верхнего приемника излучения и подвижного оптического экрана.

Схем ИДИ появятся соответствующие выходные напряжения U'_2 и U'_3 и их векторная сумма будет давать информацию о реальном направлении потока ветра с

помощью стрелки OA. На рис.3, d,e,f,g,h,I,j,k,l показаны расположения фоторезисторов 10,11,12,13 и оптических экранов 14,15 и полученные на экране компьютера изображения стрелки поворота при повороте флюгера 2 на 90,180 и 270 градусов против часовой стрелки по отношению к исходному направлению ветра, показанному на рис.1. Теория теплового преобразователя скорости термоанемометрического типа (рис.1) основана на установлении связи между скоростью воздушного потока V и распределением температуры $T(x)$ вдоль теплопровода 5 преобразователя. Рассмотрим данную тепловую систему преобразователя в виде теплового четырехполюсника, что позволит эффективно проанализировать тепловую систему состоящую из двух участков l_1 и l_2 .

В матричной форме уравнение теплового четырехполюсника с распределенным источником тепла записывается в виде:

$$\begin{vmatrix} T(x) \\ \Phi(x) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} T_q(x) \\ \Phi_q(x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T(0) \\ \Phi(0) \end{vmatrix} \quad (4.15)$$

или в операторной форме

$$\begin{vmatrix} T(x,p) \\ \Phi(x,p) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} T_q(x,p) \\ \Phi_q(x,p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A(x,p) & B(x,p) \\ C(x,p) & D(x,p) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} T(0,p) \\ \Phi(0,p) \end{vmatrix} \quad (4.16)$$

где: $T(x,p)$, $\Phi(x,p)$ - температура и тепловой поток;

$T_q(x,p)$, $\Phi_q(x,p)$ - распределенные источники температуры и теплового потока;

$T(0,p)$, $\Phi(0,p)$ - значения температуры и теплового потока в начале и в конце теплопровода; $A(x,p)$, $B(x,p)$, $C(x,p)$, $D(x,p)$ параметры теплового четырехполюсника. На основании (1) для теплового преобразователя можно написать уравнение распределения $\theta(x)$ вдоль участка $0 \leq x \leq l_1$, при постоянном тепловом потоке $q(x)=q=const$.

$$T_1(x) = T_1(0)ch\gamma_1 x + \frac{q}{g(1 - ch\gamma_1 x)} \quad (4.17)$$

и вдоль участка $l_1 \leq x \leq l_2$

$$T_2(x) = T_2(l_1)ch\gamma_2 x - z_2 \Phi_2(l_1)sch\gamma_2 x \quad (4.18)$$

В точке $x = l_1$ имеет место равенство температур $T_1(l_1) = T_2(l_1)$ и их производных

$$\left. \frac{dT_1(x)}{dx} \right|_{x=l_1} = \left. \frac{dT_2(x)}{dx} \right|_{x=l_1} \quad (4.19)$$

В результате решения уравнений получено

$$T_1(x) = \frac{q}{g_1} \left(1 - \frac{ch\gamma_1 x}{ch\gamma_2 l_1 + \frac{\gamma_2 sch\gamma_1 l_1}{\gamma_2}} \right) \quad (4.20)$$

$$T_2(x) = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left[\frac{q}{g} - T_1(0) \right] sch\gamma_1 l_1 e^{-(x-l_1)\gamma_2} \quad (4.21)$$

Анализ выражений (4.20) и (4.21) с точки зрения повышения чувствительности позволяет сделать выводы:

- 1) Участок $0 \leq x \leq l_1$, целесообразно выполнять из материалов с большим значением g и минимальным d_1
- 2) Термочувствительный элемент необходимо устанавливать на участке $0 \leq x \leq l_1$ ближе к торцевой части теплопровода при $x=0$.
- 3) Длина участка $0 \leq x \leq l_1$ должна обеспечивать выполнение условия $q(x)=const$ на участке расположения термочувствительного элемента.
- 4) Длина участка $l_1 \leq x \leq l_2$ должна обеспечить минимальное влияние изменения температуры подставки.

Измерительная схема реализующая вышеуказанный принцип приведена на рис.4.12.

На рис.4.14 приведены статические характеристики многофункционального теплового преобразователя термоанемометрического типа.

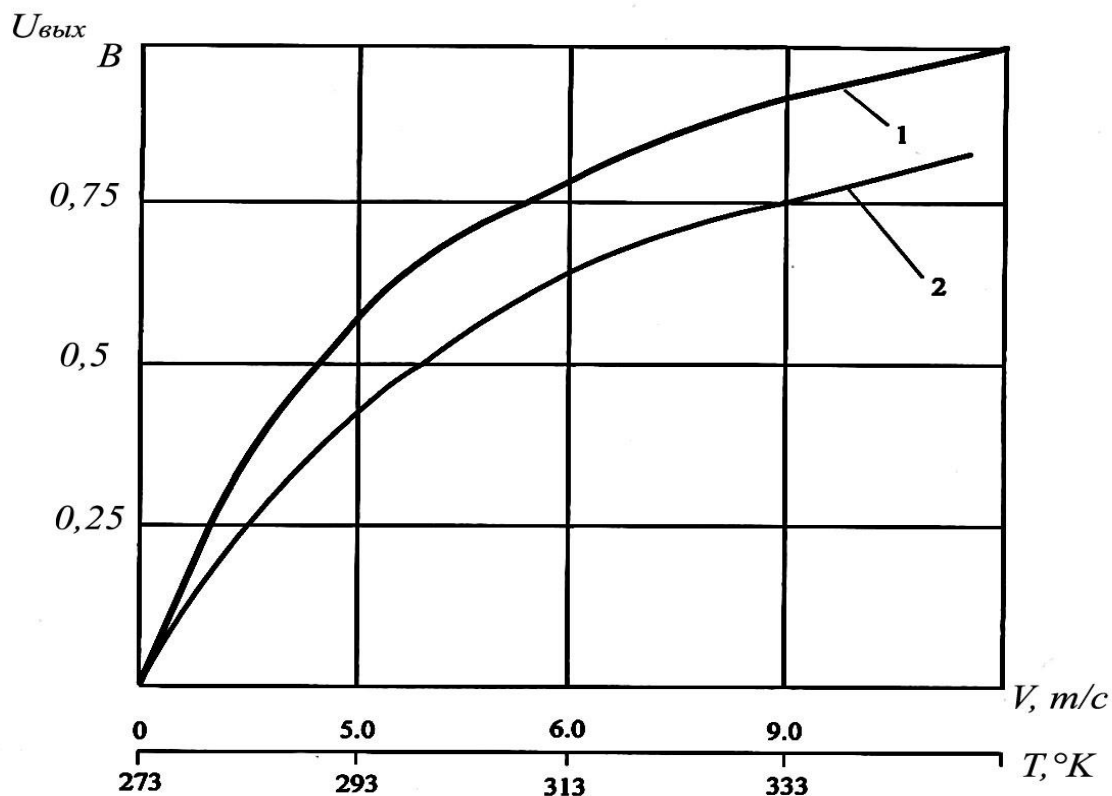


Рис.4.14. Статические характеристики теплового преобразователя: 1 – при контроле скорости потока; 2 – при контроле температуры потока.

Таким образом благодаря тому, что в мостовой измерительной схеме I основной терморезистор 6, снабженный нагревательным элементом 8 и переключателем 23, имеющим возможность поочередно подключать к плечу мостовой схемы терморезистор 6 или постоянное сопротивление 18 обеспечивается возможность с помощью дополнительного терморезистора 7 осуществлять компенсацию влияния изменения температуры воздуха при измерении скорости и отдельно измерять температуру потока воздуха. Применение кольцевого источника излучения 9, расположенного между верхними и нижними полукольцевыми фоторезисторами 10,11,12,13, соединенных в кольцо 2 и смещенных на 90 градусов относительно друг друга и расположения полудисковых оптических экранов 14,15, закрепленных на оси 3 между источником излучения и фоторезисторами 10,11,12,13 позволяет на экране компьютера получить полное изображение направления ветра в диапазоне 0-360 градусов в векторной форме.

Заключение

Анализ достигнутых результатов по исследованию, разработке и применению многофункциональных тепловых преобразователей на основе ТПТТ позволяет сделать вывод о перспективности применения данных преобразователей для разработки многофункциональных приборов контроля параметров потоков жидкостей и газов.

В данной работе проанализированы принципы построения тепловых преобразователей и показано, что для контроля различных параметров потоков жидкостей и газов наиболее перспективными являются тепловые преобразователи термоанемометрического типа (ТПТТ).

Подробно рассмотрены математические модели ТПТТ: с однородным протяженным теплопроводом цилиндрического типа; с неоднородным цилиндрическим теплопроводом с дополнительным источником и без дополнительного источника тепла. На основании разработанных математических моделей проанализированы основные характеристики ТПТТ: статические, динамические, надёжность и погрешности.

Для ТПТТ разработана методика проектирования, которая состоит из двух этапов: этапа выбора оптимальной структуры и этапа выбора оптимальных элементов и измерительных схем ТПТТ.

Приведены также примеры разработанных многофункциональных микропроцессорных приборов на основе ТПТТ: приборы для контроля температуры, скорости, расхода и наличия потока воздуха в трубопроводах; зондового прибора на основе ТПТТ для ввода в трубопроводы с жидкостью или газом для контроля параметров потоков; теплооптического прибора для контроля параметров горизонтального ветра.

Литература

1. Кремлевекий П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник. 2. / Под общ. ред. Е.А. Шорникова. 5-е изд. Перераб. и доп. Спб: Политехника2004 - 412 с.
2. Лобачев П.В., Шевелев Ф.А. Измерение расхода жидкостей и газов в системах водоснабжения и канализации. М. Стройиздат, 1985, 424 с.
3. Янбухтен И.Р. Современные турбинные расходомеры и пути их совершенствования. М. 1983. ЦНИИТЭИ приборостроения.
4. Киясбейли А.Ш., Ливщиц Л.М. Счетчики и расходомеры жидкости с овальными шестернями М.: Машиностроение, 1983, 144 С.
5. Ураксеев М. А., Романченко А. Ф., Абрешитова Д. Р., Шилова С. А. Перспективы термоанемометрических методов измерения расхода газа или жидкости. Электронный журнал «Исследовано в России». 2001г. с. 587-593.
6. Балдин А.А., Бошняк Л.Л., Соловский В.М. Ротамеры Л. Машиностроение, 1988, 198 с.
7. Бобровников Г.Н., Новожилов Б.М., Сарафанов В.Т. Бесконтактные расходомеры. М. Машиностроение, 1985, 128 с.
8. Гуревич В.М., Труман С.Г. Современные ультразвуковые расходомеры. М. 1984. ЦНИИТЭИ приборостроения.
9. Обновленский П.А., Соколов Г.А.. Тепловые системы контроля параметров химической технологии. Л. Химия, 1982, 174 с.
10. Соколов Г.А., Сячев Н.А., Тугушев К.Р. Современное состояние измерений расхода веществ тепловыми методами. СПбГТИ, СПб 2000.
11. Соколов Г. А., Ющенко О. А., Лященко А. А. Тепловые расходомеры с микропроцессорными адаптивными динамическими корректорами. Труды

Международной научно-технической конференции «Совершенствование средств измерения расхода жидкости, газа и пара». СПб., 1996.

12. А.С. № 517819. Датчик направления и скорости потока газа или жидкости. / А. Азимов, Р.К. Азимов, А.Б. Суслов, А.А. Исмаилов.
13. А.С. № 539275. Датчик наличия и направления потока / А. Азимов, Р.К. Азимов, А.Б. Суслов, А.А. Ханбабаев.
14. Кремлевский П.П. Измерение расхода и количества жидкости, газа и пара. М.: Изд. Стандартов, 1980.
15. Азимов Р.К. Измерительные преобразователи с тепловыми распределенными параметрами. М.: Энергия, 1977.
16. Варивода З.В., Камразе А.Н., Лысов В.Б. и др. Калориметрический микрорасходомер для газовых потоков. Измерительная техника № 5, 1982.
17. Соколов Г.А., Платонов Э.Г. Температурный градиент стенки канала с потоком жидкости при импульсном нагреве части наружной поверхности канала. Инженерно-физический журнал. 1985. Т. 18, № 2.
18. Кузнецов Д. Н., Зори А. А., Кочин А. Е. измерительные микропроцессорные системы скорости и температуры потока газа и жидкости. Донецк: ГВУЗ ДонНТУ, 2012, 226 с.
19. Кос. В.М., Ситницкий Ю.И. Измерение расхода жидкости и газов по местному нагреву пограничного слоя. Контрольно-измерительная техника. Львов, 1966.
20. Ярин Л. П., Генкин А. Л., Кукес В. И. Термоанемометрия газовых потоков. Л.: Машиностроение, 1983, 198 с.
21. Ташматов Х.К. Расходомер воды в трубопроводе на основе тепловых преобразователей термоанемометрического типа. Датчики и системы. 2006, № 4.

22. Ташматов Х.К. Тепловые датчики для системы управления насосными станциями. Датчики и системы. 2008, № 4.
23. Ташматов Х.К., Азимов Р.К. Поплавковые расходомеры для открытых каналов оросительных систем. Датчики и системы, 2008, № 5.
24. А.С. № 775701. Термоанемометрический датчик. Романченко А.Ф., Деньгина А.А., Данилов В.И., Игбаев Ч.Р. Сорокина В.А., 1980, Б.И. № 40.
25. А.С. № 909641. Термоанемометрический датчик. Романченко А.Ф., Клишко А.Р. 1982, Б.И. № 8.
26. Романченко А.Ф., Кудрин А.М. О перспективах расширения возможностей термоанемометрических методов измерений. // Датчики и преобразователи информационных систем измерения, контроля и управления. «Датчики - 2000». 12 НТК. М. МГНЭМ, 2000.
27. Романченко А.Ф. Информационно-измерительные системы нестационарного энергетического состояния. Уфа, 2000.
28. Романченков А.Ф. Расширение функциональных возможностей термоанемометрических датчиков нестационарного энергетического состояния. Электронный журнал «Исследовано в России». <http://zhurnal.arelam.ru/articles/2001/050pdf>.
29. Ярин Л.П., Генкин А.Л., Кузнец В.И. Термоанемометрия газовых потоков. Л. Машиностроение. Лен. отд. 1983.
30. Адемечев В.В., Егорин М.А., Поломошнов С.А., Чаплыгин Ю.А. Разработка термоанемометрического преобразователя для контроля расхода газа. ГНТТ ГУ НПК «Технологический центр МИЭТ», М., 2006.
31. Зыбайло А. Датчики расхода газа фирма Honeywell // Электроника: Наука, технология. Бизнес, № 5 2003, С. 44.

32. Новокрешенова Е.П., Рембеза С.И. Микроэлектронный датчик скорости газовых потоков // Датчик - 2000 материала конференции, май, 2000.
33. Котов В.Н., Черепяхин И.И. Интегральный кремневый микро-анемометр для измерения расхода жидких и газообразных сред // Микро-системная техника. № 8, 2003, С. 14-20.
34. Ru 2276775. Термоанемометрический датчик массового расхода жидкостей и газов.
35. Ru 2276331. Тепловой расходомер.
36. Ru 2201581. Термоанемометрический датчик массового расхода воздуха.
37. Попов В. С. Металлические подогреваемые сопротивления в измерительной технике и автоматике. М.: Наука, 1980.
38. Датчик расхода газа проточного типа ST98L. Промтех. www.promtex.ru
39. Коротков П.А., Беляев Д.В., Азимов Р.К. Тепловые расходомеры. Л.: Машиностроение, 1969.
40. Зори А. А., Кузнецов Д. Н. Методы и программно-аппаратные средства автоматизированной системы градуировка первичных измерительных преобразователей термоанемометров. Известия ТРТУ, Таганрог, 2002, №2, с. 148-150.
41. Раннев Г. Г. Информационно-измерительная техника и электроника. М.: Академия, 2006, с. 512.
42. Ференец В.А. Полупроводниковые струйные термоанемометры. М. Энергия, 1972.
43. Каримов Р.Х., Жерхиев В.И., Романенко В.Н. Полупроводниковые термоанемометры косвенного подогрева, Ташкент, ФАН, 1986.

44. Бобков В.П., Грибанов Ю.И. Статистические измерения в турбулентных потоках. М. Энергоатомиздат, 1988.
45. Probe Catalog: Проспект / Dantec Electronic. 1985, 24 p (Дания).
46. Constant temperature anemometer: Проспект / Dantec Electronic. 1987, 27 p (Дания).
47. Three - Component Thermal Anemometry Systems: проспект / TST, 1987, 4 p. (США).
48. Петров В.П., Сугрей В.И. Двухкомпонентный термогидрометр постоянной температуры с цифровой регистрацией сигналов. Приборы и техника эксперимента, № 1, 1985.
49. Селянов М.Т. Термоанемометры для измерения низких и сверхнизких скоростей потока газа и жидкости. // Измерительная техника, № 3, 1984.
50. Пат ФРГ 3302080 MKU G01F1/68 Thermischer Massendurchflussmesser, insbesondere fur Gase. Оpubл. 26.07.84.
51. А.С. 1337779. MKU G01 P5/00. Устройство для измерения скорости и направления потока. Бюл. Изобретений № 4, 1987.
52. А.С. 1377745 MKU G01 P5/12. Устройство для измерения скорости и температуры потока жидкости. Бюл. Изобретений № 8, 1988.
53. Пат. Япония № 55 - 20193 опубл., 1980.
54. Азимов Р.К. , Азимов 'А., Суслов А.Б. Выбор оптимальных параметров тепловых датчиков направления и скорости потоков //. Приборы и системы управления. 1979, № 4, с. 22-27.
55. А.С. № 171084. Измеритель скорости и направления потока жидкости или газа. Азимов Р.К., Азимов А., Гуткин С.Н. Бюл. Изобретений № 5, 1992.

56. Елейникова Л.С. Тепловые четырехполюсники. Минск. Наука и техника, 1976.
57. Азимов Р.К., Ходжаев С.С. Анализ тепловых первичных преобразователей на основе стречневых теплопроводов // Изв. АН РУз. Сер. Техн. Наук, 1985, № 3
58. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М. Энергоиздат., 1981.
59. Исмагуллаев П.Р., Азимов Р.К. Первичные преобразователи информации. Ташкент, ТашПИ, 1986.
60. Полищук Е.С. Измерительные преобразователи. Киев: Вища школа, 1981.
61. Азимов Р.К., Ходжаев С.С., Расулов И.Б. Тепловой преобразователь первичной информации. // Доклады АН Уз ССР, 1983, № 6.
62. А.С. № 712761. Индикатор направления и скорости потока. Колмыков С.П., Азимов Р.К. Бюл. Изобретений, № 4, 1980.
63. Гудкова И.Н., Кудрявцева Л.Н., Туголукова Т.А. Зарубежные приборы контроля параметров технологических процессов. Приборы, средства автоматизации и систем управления. М. 1987.
64. Азимов Р. К., Шипулин Ю. Г., Максудов С. А. Термоанемометрические преобразователи расхода для аспирационных пробоотборников контроля загрязненности воздуха. STANDART, Ташкент 2011, №1.
65. Патент RU №2101756 С1 G01 W1|02. Слисинок В.Н., «Приборы для контроля направления и скорости ветра». Опубликовано 10.01.1998г.
66. Патент № 2073872 С1 G01 P5/06 Брагин В.Е., Кудряцев Л.С., Левашкин В.Е. и др. «Устройство для определения направления и скорости ветра».

Опубликовано 20.02.1997 г.

67. Гречишников В.М., Конюхов Н.Е. «Оптоэлектронные цифровые датчики перемещений со встроенными волоконно-оптическими линиями связи» М.Энергоатомиздат, 1992 г.

68. Азимов Р.К., Шипулин Ю.Г., Райимжанова О.С., “Устройство для измерения скорости и направления горизонтального ветра”. Патент РУз № IAP 04754 от 21.02.2013.

69. Азимов Р.К., Азимов А. «Тепловые преобразователи скорости и направления потоков газов и жидкостей» М. Энергоатомиздат, 1990 г. 60с.