

УДК 543.271.08

Исследование динамических характеристик термокондуктометрических и термомагнитных газоанализаторов. Двас В.С.//Научное приборостроение. Формирование пучков заряженных частиц. Л.: Наука, 1990. - С. 85-93.

Получено уравнение, связывающее в явном виде динамическую погрешность газоанализатора с конструктивными параметрами измерительной ячейки и чувствительного элемента - терморезистора с одной стороны, и характером изменения во времени концентрации измеряемого компонента в контролируемой газовой смеси, с другой. Найдены аналитические представления постоянной времени термокондуктометрического и термомагнитного датчиков в зависимости от конструктивных параметров и режима работы, коррелирующие с известными соотношениями более общего вида. Приведены результаты экспериментального определения постоянной времени ряда конструкций, хорошо коррелирующие с расчетными значениями. Полученные данные позволяют производить расчетные оценки динамических характеристик газоанализаторов на стадии их проектирования. Лит. - 8 назв.

В.С.Дзас (НТО АН СССР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОКОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ И ТЕРМОМАГНИТНЫХ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ

При контроле состава газовых средств, претерпевающих изменение параметров во времени, динамические свойства газоаналитических устройств приобретают большое, а при быстропротекающих процессах – определяющее значение. Если при этом газоанализатор помещен непосредственно в зону, где требуется контролировать состав газа, и, следовательно, времени для транспортирования пробы газа до измерительной ячейки газоанализатора не требуется, очевидно, что временные характеристики процесса измерения целиком определяются лишь инерционностью газоанализатора.

Измерительная схема термокондуктометрического (или термоманитного) газоанализатора состоит, как правило, из двух звеньев – измерительного моста датчика с чувствительными элементами (ЧЭ) – терморезисторами и операционного усилителя, формирующего унифицированный электрический сигнал. Считая преобразования, осуществляемые в усилителе, безынерционными, естественно при изучении динамических свойств газоанализатора ограничиться только рассмотрением инерционных свойств датчика – термокондуктометрического (или, соответственно, термоманитного).

Как измерительное устройство такой датчик представляет собой аналоговый измерительный преобразователь, входной величиной которого является содержание контролируемого компонента в газовой смеси, а выходной величиной – напряжение в измерительной диагонали моста.

Введем понятие динамической погрешности датчика β с помощью соотношения

$$\beta = U(\tau) - S_0 \cdot C(\tau), \quad (1)$$

где $U(\tau)$, $C(\tau)$ – текущие значения в момент времени τ выходного напряжения датчика и содержания (например, объемной доли) контролируемого компонента в газовой смеси, соответственно; S_0 – чувствительность датчика, определяемая его статической характеристикой.

Среди известных способов описания динамических свойств средств измерений наиболее удобным и наглядным является рассмотрение переходной функции измерительного устройства [1], т.е. изменения выходной величины при изменении входной величины в виде единичного скачка при нулевых начальных условиях.

Как показывает эксперимент, изменение сигнала термокондуктометрического (термомангнитного) датчика при скачкообразном изменении объемной доли контролируемого компонента на входе датчика в момент времени $\tau = 0$ хорошо аппроксимируется экспонентой вида

$$U(\tau) - U_0 = (U_\infty - U_0) \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_0}}\right), \quad \tau > 0, \quad (2)$$

где U_0 – исходное значение сигнала $U(\tau)$ при $\tau = 0$; U_∞ – установившееся значение сигнала $U(\tau)$ при $\tau \rightarrow \infty$; $T_0 = \text{const}$.

Следовательно, датчик может быть представлен как инерционное аperiodическое звено, описываемое следующим дифференциальным уравнением [1]:

$$T_0 \frac{dU(\tau)}{d\tau} + U(\tau) = S_0 \cdot C(\tau), \quad (3)$$

а константа T_0 приобретает смысл постоянной времени этого звена.

В работе [2] выведены соотношения, связывающие в явном виде чувствительность датчика S_0 с его схемно-конструктивными параметрами для каждого из рассматриваемых типов датчика.

Для того, чтобы уравнение (3) было полностью определено, необходимо, очевидно, найти явное представление постоянной времени датчика T_0 через его конструктивные параметры. Для отыскания такой зависимости представим преобразования, осуществляемые во времени датчиком, в виде последовательности приращений соответствующих величин аналогично квазистатическому случаю, рассмотренному в работе [2]:

$$\Delta C_0(\tau) \rightarrow \Delta \bar{C}(\tau) \rightarrow \Delta \bar{h}(\tau) \rightarrow \Delta \bar{t}(\tau) \rightarrow \Delta R(\tau) \rightarrow \Delta U(\tau),$$

где C_0 – объемная доля контролируемого компонента в плоскости входного сечения измерительной ячейки датчика; $\bar{C}$ – среднеинтегральное по объему значение объемной доли C ; $\bar{h}$ – среднеинтегральное по боковой поверхности ЧЭ значение коэффициента теплоотдачи; $\bar{t}$ – среднеинтегральная по длине температура остеклованной обмотки ЧЭ; R – полное сопротивление ЧЭ.

Заменяя в этой последовательности безынерционные преобразования символами $(\dots \rightarrow)$, получим такую последовательность преобразований

$$\Delta C_0(\tau) \rightarrow \Delta \bar{C}(\tau) \rightarrow \Delta \bar{h}(\tau) \rightarrow \Delta \bar{t}(\tau) \rightarrow \Delta U(\tau),$$

которая приводит нас к модели датчика в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев 1 и 2. В качестве первого звена модели принимаем процесс диффузионного газообмена в объеме измерительной ячейки датчика при изменении во времени объемной доли контролируемого компонента в плоскости входного сечения ячейки.

Второе звено моделирует процесс изменения среднеинтегральной температуры остеклованной обмотки ЧЭ при изменении коэффициента теплоотдачи $\bar{h}$.

Основываясь на общих соображениях, предположим, что каждое из звеньев 1 и 2 является аperiodическим звеном 1-го порядка и, следовательно, (см. уравнение (3)), описывается дифференциальным уравнением общего вида

$$T_i \frac{dy_i(\tau)}{d\tau} + y_i(\tau) = K_i \cdot X_i(\tau), \quad i = 1, 2, \quad (4)$$

где T_i — постоянная времени i -го звена; K_i — статический коэффициент передачи i -го звена; $X_i(\tau)$ и $y_i(\tau)$ — входная и выходная величины звена, соответственно.

Из теории автоматического регулирования [3] известно, что последовательное соединение двух аperiodических звеньев 1-го порядка с постоянными времени T_1 и T_2 эквивалентно аperiodическому звену 2-го порядка, описываемому следующим дифференциальным уравнением:

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \frac{d^2 y}{d\tau^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{d\tau} + y = K \cdot X(\tau) \quad (5)$$

и имеющему переходную характеристику вида

$$y = y_{\infty} \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\tau}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\tau}{T_2}} \right), \quad T_1 > T_2. \quad (6)$$

Сопоставление уравнений (6) и (5) с (3) и (2), соответственно, показывает, что для выявления соотношения между постоянными времени T_1 и T_2 звеньев модели датчика, с одной стороны, и постоянной времени T_0 , приписываемой датчику на основе экспериментальной переходной характеристики, с другой стороны, необходимо решать систему трансцендентных уравнений (2), (6), что представляет известные трудности. Поэтому для упрощения нашей модели датчика примем

$$T_1 \cdot T_2 \ll T_1 + T_2.$$

Тогда в уравнении (7) можно пренебречь первым слагаемым ввиду его малости, и это уравнение сводится к уравнению вида (4) или (3), т.е., как указано в работе [3], два последовательно соединенных аperiodических звена 1-го порядка с малыми постоянными времени становятся эквивалентными одному аperiodическому звену 1-го порядка с постоянной времени T_0 , равной

$$T_0 \approx T_1 + T_2. \quad (7)$$

Покажем теперь, что звенья 1 и 2 принятой нами модели действительно являются аperiodическими звеньями 1-го порядка, а также что соотношение (7) с удовлетворительным приближением пригодно для оценки постоянной времени T_0 как термокондуктометрического, так и термомагнитного датчика.

Представив диффузионную модель ампулы ЧЭ термокондуктометрического датчика в виде воздушного цилиндра длиной ℓ и вводя параллельную оси цилиндра координатную ось OX с началом отсчета, лежащим в плоскости входного отверстия ампулы, будем искать объемную долю контролируемого компонента C как функцию координаты X и времени τ при условии, что с момента времени $\tau = 0$ вход ампулы сообщается с атмосферой, в которой объемная доля контролируемого компонента в ампуле $C_0 =$

$= \text{const}$, а начальная объемная доля этого компонента равна нулю.

Эта задача, согласно работе [4], сводится к следующей краевой задаче:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2}; & 0 < X < \ell; & 0 < \tau < +\infty \\ C(0, \tau) &= C_0; & 0 < \tau < +\infty \\ C(X, 0) &= 0; & 0 < X < \ell \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

где D — коэффициент диффузии контролируемого компонента в газ начального состава.

Как показано в работе [5], решение задачи (8) приводит в достаточном для практических целей приближении к следующему выражению для постоянной времени T_1 диффузионного газообмена в ампуле ЧЭ:

$$T_1 = \frac{4\ell^2}{\pi^2 D}. \quad (9)$$

Перейдем к рассмотрению термической постоянной времени термокондуктометрического датчика.

В работе [5] задача отыскания термической постоянной чувствительного элемента — терморезистора T_2 моделирована как классическая краевая задача отыскания пространственного и временного распределения температуры однородного тела, не содержащего источников тепла, при известном законе теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Такая формулировка задачи может рассматриваться лишь как приближенная: во-первых, ЧЭ в рабочем состоянии является распределенным источником тепла, во-вторых, практически невозможно достаточно корректно определить и, следовательно, задать коэффициент теплоотдачи на поверхности миниатюрного терморезистора, находящегося в ограниченном пространстве. Поэтому в статье принят следующий подход к этой задаче.

Введем по аналогии с процессом переноса электричества понятие проводимости стационарного теплового потока σ согласно следующему известному определению (см., например, работу [2]):

$$Q = \sigma(\bar{t} - t_c),$$

где Q — тепловой поток, рассеиваемый обмоткой ЧЭ в стационарном тепловом режиме; t_c — температура "стенок" измерительной камеры (внутренней поверхности ампулы ЧЭ).

В стационарном режиме, соответствующем частному случаю отсутствия контролируемого компонента в газе ампулы ЧЭ ($C = 0$), имеет место тепловой баланс ЧЭ в соответствии с соотношением

$$W_0 = Q_0 = \sigma_0(\bar{t}_0 - t_c), \quad (10)$$

где W_0 — выделяющаяся в обмотке ЧЭ мощность.

При квазистатическом изменении среднеинтегральной по объему ампулы объемной доли контролируемого компонента на величину $\Delta \bar{C}$ происходит изменение тепловой проводимости σ_0 на величину $\Delta \sigma$. Вследствие этого изменяется на величину $\Delta \bar{t}$ температура обмотки ЧЭ и, следовательно, изменяется его теплосодержание. Уравнение теплового баланса обмотки ЧЭ для любого малого отрезка времени в течение переходного процесса может быть поэтому представлено в следующем виде:

$$W_0 \Delta \tau = (\sigma_0 + \Delta \sigma)(\bar{t}_0 + \Delta \bar{t} - t_c) \Delta \tau + \sigma_0 \Delta \bar{t}, \quad (11)$$

где σ_0 — полная теплоемкость остеклованной обмотки ЧЭ.

Вводя новую переменную

$$\bar{\nu} = \bar{t} - t_c = (\bar{t}_0 + \Delta \bar{t}) - t_c \quad (12)$$

и переходя к бесконечно малым приращениям, приведем (11) к следующему виду:

$$T \frac{d\bar{\nu}}{d\tau} + \bar{\nu} = T \frac{W_0}{G_0}, \quad (13)$$

где

$$T = \left[\frac{G_0}{G_0} \left(1 + \frac{\Delta G}{G_0} \right) \right]^{-1} \approx \text{const.} \quad (14)$$

Используя известное решение уравнения (13) при начальном условии

$$\bar{\nu}|_{\tau=0} = \bar{\nu}_0 = \frac{W_0}{G_0}, \quad (15)$$

следующем из совместного рассмотрения уравнений (12) (при $\Delta t = 0$) и (10), и переходя к исходной переменной в соответствии с (12), получим экспоненциальное уравнение переходного процесса изменения температуры обмотки ЧЭ:

$$\Delta \bar{t}(\tau) = \bar{\nu}_0 \left(e^{-\frac{\tau}{T}} - \frac{\Delta G}{G_0} \right),$$

в котором величина T имеет физический смысл термической постоянной времени обмотки ЧЭ T_2 [6].

Произведенная оценка показала, что в термокондуктометрических и термомангнитных датчиках имеет место соотношение

$$\left| \frac{\Delta G}{G_0} \right| \leq 2,5 \cdot 10^{-2}.$$

Следовательно, с погрешностью не более $2,5 \cdot 10^{-2}$ можно заменить уравнение (14) приближенным (22) с одновременным использованием обозначения T_2 :

$$T_2 = \frac{G_0}{G_0}. \quad (16)$$

Производя в уравнении (16) замену величины G_0 с учетом (10) и (12), а полной теплоемкости G_0 — через характеристики обмотки ЧЭ в соответствии с определением, получим окончательно:

$$T_2 = \frac{\pi}{4} g \cdot r \cdot d_0^2 \cdot l_0 \cdot \frac{\bar{\nu}_0}{W_0}, \quad (17)$$

где g и r — эффективные значения, соответственно, удельной теплоемкости и плотности композитного "материала", из которого изготовлена обмотка ЧЭ (остеклованная платиновая спираль); d_0 и l_0 — соответственно, диаметр и длина остеклованной спирали.

Здесь важно отметить, что полученное соотношение (16) совпадает по структуре с известным из теории регулярного теплового режима [7] выражением термической постоянной времени ε однородного тела, не содержащего источников тепла, в переходном режиме его охлаждения в среде с постоянной температурой:

$$\varepsilon = \frac{G}{\alpha F},$$

где α — коэффициент теплоотдачи на поверхности тела к среде; F — площадь поверхности теплообмена; G — полная теплоемкость тела.

Это, во-первых, подтверждает применимость метода "электротепловой" аналогии к случаю динамического режима, во-вторых, позволяет применять экспериментальные

методы теории регулярного теплового режима для определения термической постоянной T_2 чувствительного элемента, выполненного из "платино-стеклянного" материала с трудноопределяемыми физическими константами.

Поскольку теперь все величины, входящие в уравнения (9) и (17), могут быть определены известными способами расчетным или экспериментальным путем, то с учетом (7) уравнение (3), описывающее динамические процессы в датчике, становится полностью определенным, что позволяет перейти к отысканию аналитического выражения для динамической погрешности датчика, представленной в самом общем виде соотношением (1).

Используя математическую аналогию результата, полученного в работе [7] при решении одной задачи теории регулярного теплового режима, можно показать, что общий интеграл дифференциального уравнения (3) при начальных условиях

$$C(\tau)|_{\tau=0} = C_0, \quad U(\tau)|_{\tau=0} = U_0 \quad \text{сводится к следующему виду:}$$

$$U(\tau) - S_0 C(\tau) = (U_0 - S_0 C_0) e^{-\frac{\tau}{T_0}} - e^{-\frac{\tau}{T_0}} \int_0^{\tau} e^{\frac{\tau}{T_0}} \cdot S_0 \cdot C'(\tau) d\tau, \quad (18)$$

$$C'(\tau) = \frac{dC(\tau)}{d\tau}.$$

Полученное уравнение является (см. уравнение (1)) выражением для динамической погрешности датчика, справедливым для самого общего случая.

Таким образом, уравнение (18) позволяет вычислять значения динамической погрешности $\beta(\tau) = U(\tau) - S_0 \cdot C(\tau)$ в зависимости от статической погрешности термокондуктометрического датчика, численно равной $U_0 - S_0 C_0$, конструктивных параметров датчика, определяющих величины S_0 и T_0 , и характера изменения во времени доли контролируемого компонента $C(\tau)$.

Рассмотрим термомагнитный датчик. Как известно (см., например, работу [2]), камера термомагнитного датчика имеет размеры, при которых в объеме камеры вблизи нагретых ЧЭ возникает, в отличие от термокондуктометрического датчика, естественная тепловая конвекция, а вблизи рабочего ЧЭ при наличии кислорода — еще и термомагнитная конвекция. Конвективная составляющая теплообмена влияет на температуру ЧЭ и в квазистационарном режиме учтена в качестве константы датчика, входящей в виде коэффициента в выражение чувствительности S_0' термомагнитного датчика [2]. В случае же динамического режима эти два параллельно идущих процесса газообмена — диффузионный и конвективный — промоделировать раздельно не представляется возможным. С другой стороны, экспериментально можно определить только термическую постоянную времени ЧЭ T_2 (см., например, работу [7]) и постоянную времени T_0 датчика в целом. Поэтому представляется целесообразным применить сочетание расчетного и экспериментального методов определения постоянной времени процесса газообмена в ячейке термомагнитного датчика. А именно, принимая во внимание, что на практике $T_2 \ll T_1$, в качестве одного из таких подходов может быть предложено использование соотношений (7), (9) и (17) с введением эмпирического коэффициента:

$$T_0' = T_0 \cdot K = (T_1 + T_2) K, \quad (19)$$

где $K = \text{const}$ — константа датчика, учитывающая конвективную составляющую газообмена, а остальные величины соответствуют (9) и (17). При этом появляется воз-

возможность производить оценку постоянной времени термомагнитного датчика T'_0 в два этапа. На этапе проектирования датчика, когда выбрана и, следовательно, известна геометрия его камеры, а также известны расчетные параметры режима его работы, можно рассчитать ожидаемое заниженное значение величины T'_0 по формуле (19), положив в ней $K = 1$. Затем после изготовления датчика можно определить из эксперимента значение постоянной времени датчика $T_0^{\text{эксп}}$ и термической постоянной времени $\tau_2^{\text{эксп}}$ и определить значение K из следующего соотношения:

$$T_0^{\text{эксп}} = (T_1^{\text{расч}} + \tau_2^{\text{эксп}}) K,$$

где $T_1^{\text{расч}}$ определяют по-прежнему по формуле (9). В дальнейшем по мере накопления экспериментальных данных можно создавать банк этих данных, в котором будут сопоставлены различные конфигурации рабочих объемов камер термомагнитных датчиков с соответствующими им значениями коэффициента газообмена K в формуле (19). А это позволит осуществлять более точные расчеты постоянной времени датчика T'_0 на этапах проектирования следующих образцов газоанализаторов.

Анализ формул (9), (17) и (19) показывает, что для уменьшения постоянной времени термокондуктометрического датчика необходимо уменьшать длину газового канала измерительной ячейки, а также габаритные размеры и массу рабочей части (остеклованной обмотки) чувствительного элемента, а для случая термомагнитного датчика – еще и интенсифицировать конвективную составляющую теплоотдачи (увеличивать K в формуле (19)). Для достижения последнего необходимо, во-первых, уменьшать (исключать) паразитные объемы технологических полостей датчика за счет упрощения конфигурации и уменьшения рабочего объема газового канала ячейки, во-вторых, разрабатывать конструкцию датчика с выполнением условия, чтобы векторы термомагнитной и естественной конвекции были сонаправлены и встречны вектору направления диффузионного потока газа в ячейку.

С учетом этих рекомендаций в СКБ АП АН СССР разработаны экспериментальные образцы термокондуктометрического датчика МВ728 и термомагнитного датчика МВ897, которые исследованы вместе с соответствующими датчиками традиционных типов: термокондуктометрическим ИГ2.840.730 и термомагнитным ИГ2.840.729.

В таблице приведены результаты расчетного и экспериментального определения значений постоянной времени датчиков T_0 и соответствующих составляющих T_1 и τ_2 постоянной T'_0 . Эксперименты проводились при скачкообразном изменении на входе термокондуктометрических датчиков объемной доли водорода или двуокиси углерода, а на входе термомагнитных датчиков – кислорода.

Экспериментальные значения величины T'_0 , приведенные для термомагнитных датчиков в строке "а", соответствуют ориентации датчика, при которой векторы "магнитной" и тепловой конвекции повернуты друг относительно друга на угол $\pi/2$, а в строке "б" – когда они сонаправлены. Приведенные в столбце " T_0 , T'_0 эксперимент" значения погрешности измерения представляют собой средние арифметические отклонения от среднего значения при выборке из десяти измерений.

Сопоставление приведенных в таблице расчетных значений термической постоянной $\tau_2^{\text{расч}}$ с имеющимся, правда, единственным полученным нами по методике [8] экспериментальным значением $\tau_2^{\text{эксп}} = (0,6 \pm 0,1)$ с, показывает, что расхож-

Номер чертежа датчика	Измеряемый компонент		T_1, c	T_2, c	T_0, T_0', c	
			расчет	расчет	расчет	эксперимент
ИГ2.840.730	H_2		1,76	0,85	2,6	4,4 $\pm 0,1$
			8,45	0,85	9,30	10,7 $\pm 0,2$
	CO_2		0,59	0,63	1,22	2,7 $\pm 0,1$
			2,89	0,63	3,52	7,0 $\pm 0,1$
ИГ2.840.729	O_2	δ	11,94	0,59	12,53K	12,2 $\pm 0,4$
		α	11,94	0,59	12,53K	15,4 $\pm 0,3$
	O_2	a	3,13	0,59	3,7K	7,3 $\pm 0,3$
		δ	3,13	0,59	3,7K	6,0 $\pm 0,3$

деление между средними значениями этих двух величин не превышает 15 % ($T_2^{\text{расч}} = (0,69 \pm 0,2) c$), т.е. находится в пределах погрешности измерения. И хотя расхождение крайних значений более существенно, что может быть объяснено как различием массогабаритных параметров ЧЭ, так и несовпадением для трех исследованных типов ЧЭ фактических значений величины $\bar{V}_0$ в формуле (17), совпадение экспериментальных и расчетных данных можно считать вполне удовлетворительным при скудности экспериментальных данных. Далее, как следует из таблицы, практически во всех случаях экспериментальные значения постоянной времени термокондуктометрического датчика $T_0^{\text{эксп}}$ превышает расчетные значения $T_0^{\text{расч}}$. Это объясняется наличием на входном отверстии каждого датчика достаточно плотной защитной металлической сетки, что приводит к уменьшению площади сечения входного отверстия по сравнению с площадью среднего сечения газового канала ячейки не менее чем в два раза и, следовательно, к появлению двухмерного диффузионного потока в полости измерительной ячейки датчика, т.е. к замедлению осевого газообмена, а также неучтенным увеличением длины ℓ ячейки, имеющим место в реальной конструкции датчика.

Выполнение сформулированных рекомендаций позволило довести постоянную времени T_0 в датчике водорода МВ728 до значения 2,7 с, а в датчике кислорода МВ897 – до значения 6,0 с, которые являются наименьшими, соответственно, для термокондуктометрических и термомагнитных датчиков, разработанных в СКБ АП АН СССР. Датчики соответствующих конструкций успешно применены в разработанных в этой организации газоанализаторах водорода ТП1140, кислорода МН5140 и винаила ТП9803.

Наряду с этим следует отметить, что в рассмотренной задаче исследования динамических характеристик остаются два вопроса, решение которых способствовало бы повышению точности расчетных формул. Во-первых, следовало бы отказаться от упрощения принятой двухзвенной модели, приводящего к простому суммированию постоянных времени диффузионного газообмена T_1 и термической постоянной времени T_2 в соответствии с соотношением (7) и решать более строгую систему уравнений (2), (6). Во-вторых, следовало бы разработать методику экспериментального определения проводимости теплового потока от чувствительного элемента к "стенкам" камеры δ_0 , вводимой соотношением (10), или однозначно связанного с ней в соответствии с соотношением (15) перегрева $\bar{\theta}_0$ чувствительного элемента.

1. Электрические измерения неэлектрических величин/Под ред. П.В.Новицкого. — Л.: Энергия, 1975. — С. 156-172.
2. Давыдов Н.А., Двас В.С. Статические характеристики газоанализаторов на терморезисторах./Тез.докл.всес.конф. "Состояние и перспективы развития аналитического приборостроения до 1985 года". (г.Тула, ноябрь, 1975 г.). Секция "Газоанализаторы для контроля и регулирования технических процессов". — М., 1975. — С. 5-16.
3. Попов Е.П. Автоматическое регулирование и управление. — М.: Физматгиз, 1962. — С. 68-72, 98.
4. Будаг Б.М. и др. Сборник задач по математической физике. М.: Наука, 1972. — С. 55, 296-297, 306-307.
5. Михальчук Н.С. и др./Коррекция динамических характеристик тепловых газоанализаторов//Научное приборостроение: Сб.научн.тр. — Л.: Наука, 1983.— С. 51-57.
6. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. — М.: Физматгиз, 1961. — С. 38.
7. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения.—М-Л.: Машгиз, 1957. — С. 48-67.
8. А.с. 615422 СССР. Устройство для определения постоянной времени терморезисторов/Давыдов Н.А., Двас В.С. — Оpubл.в Б.И., 1978, № 26.

Р.А.Ситдыков, В.Е.Курочкин, Д.М.Ивницкий, Л.С.Рейфман (НТО АН СССР)

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ДЛЯ ТВЕРДОФАЗНОГО ИММУНОФЕРМЕНТНОГО АНАЛИЗА

Иммунохимические методы анализа, основанные на специфическом связывании антителами определяемого антигена, широко применяются в различных областях медицины, биохимической промышленности, сельского хозяйства и с целью контроля окружающей среды.

В последние годы интенсивные исследования проводятся в области иммуноферментного анализа (ИФА). Причиной этому является высокая чувствительность (10^{-11} —

10^{-15} М) и специфичность ИФА, доступность и относительная дешевизна многих ферментов-маркеров, длительная сохранность меченных реактивов, безопасность работы с ними. Область применения ИФА также широка, как и радиоиммунологического метода анализа. Вместе с тем быстрое внедрение ИФА в практику требует решения ряда важных технических проблем. В первую очередь это связано с разработкой простой портативной регистрирующей аппаратуры.

Большинство иммуноферментных методов анализа базируются на спектрофотометрической детекции результатов. Для этого используются специальные фотометры, серийный выпуск которых в нашей стране начался в 1989 году, С этой целью разработан электрохимический детектор результатов ИФА.

В основу его работы положены иммунохимическая реакция в лунках полистироловых планшет, реакция пероксидазного окисления иодид-ионов и электрохимическое