

*На правах рукописи*

**УДАРАТИН АЛЕКСЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ УРОВНЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА  
ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА С ПРИМЕНЕНИЕМ  
РАЗРАБОТАННОГО ДАТЧИКА МЕТАНА**

Специальность:

05.26.03 - Пожарная и промышленная безопасность  
в нефтегазовом комплексе

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2005

Работа выполнена на кафедре электрооборудования Вологодского государственного технического университета.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук,  
профессор Федоров М.И.

**Официальные оппоненты** – доктор технических наук,  
Федоров А.В.  
доктор технических наук,  
Гуляев А.М.

**Ведущее предприятие** – ФГУП НПП «Дельта»

Защита состоится 22 февраля 2005 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К212.200.01 в Российском Государственном Университете нефти и газа им. И.М. Губкина по адресу: 119997, ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, дом 65.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

Автореферат разослан 21 января 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат химических наук,  
доцент

Глебова Е.В.

Общая характеристика работы.

**Актуальность проблемы.** Нефтегазовый комплекс России является бюджетообразующей отраслью экономики и во многом определяет социально-экономическое состояние страны. Обеспечение пожарной и промышленной безопасности в данной отрасли является важной и актуальной задачей.

К сожалению, в последнее время участились случаи катастроф в нефтяной, угольной и газовой отрасли, которые уносят жизни сотен людей. Ежегодно происходит около 20 тыс. аварий, связанных с опасным загрязнением воздуха (по данным Госкомэкологии, Минтопэнерго и МЧС России). Одной из наиболее распространенных причин тяжелых последствий пожаров, взрывов и отравлений опасными газами является недостаточно точный и оперативный контроль за их концентрацией в воздухе.

В настоящее время для обнаружения пожаров применяется целый ряд типов пожарных извещателей, действие которых основано на фиксировании опасных факторов пожара (наличия дыма, повышение температуры, открытого пламени и т.д.). Для них характерен один недостаток – такие датчики «ждут» когда опасные факторы пожара достигнут самого извещателя. Поэтому важной задачей становится *предупреждение* пожаро- или взрывоопасной ситуации путем контролирования химического состава воздуха рабочей зоны и своевременное предупреждение персонала об опасности.

Одним из самых опасных газов воздушной среды производственных помещений нефтегазового комплекса является метан ( $\text{CH}_4$ ). Он не только токсичен для персонала и горюч, но создает в смеси с воздухом взрывоопасную концентрацию, поэтому контроль концентрации данного газа в воздухе необходим.

Переход к управлению промышленной безопасностью по критериям приемлемого риска и законодательное требование «постоянно осуществлять прогнозирование вероятности возникновения аварий и катастроф» в отношении каждого опасного производственного объекта систем газоснабжения и нефтедобычи приводят эксплуатирующие объекты газового хозяйства организации к необходимости оценки опасности этих объектов и поиску путей снижения вероятности возникновения аварий и катастроф.

Учитывая изложенное, в настоящей работе проведено дальнейшее изучение и разработка путей повышения качества контроля содержания метана. Разработан датчик (первичный измерительный преобразователь)  $\text{CH}_4$  и технические средства контроля концентрации метана на его основе для предприятий нефтегазового комплекса, отличающиеся высокой точностью, чувствительностью и безопасностью, простотой и удобством применения.

**Цель работы** состоит в повышении качества контроля метана ( $\text{CH}_4$ ) на предприятиях нефтегазового комплекса и, как следствие, повышении уровня пожарной и взрывобезопасности путем разработки и применения новых, более совершенных технических средств измерения его концентрации. Главная научная цель работы состоит в разработке основ функционирования датчика устройств для измерения концентрации  $\text{CH}_4$  в помещениях нефтегазового комплекса.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработка датчика (первичного измерительного преобразователя) для технических средств контроля метана;
- теоретический анализ влияния условий работы датчика метана на его электрофизические характеристики;

- разработка математических моделей, устанавливающих количественные связи между характеристиками датчика концентрации  $\text{CH}_4$  и условиями его работы, определение оптимального режима работы датчика;
- исследование процессов функционирования и старения датчика концентрации метана в условиях помещений нефтегазового комплекса;
- разработка технических средств контроля  $\text{CH}_4$  для предприятий нефтегазового комплекса, т.е. принципиальных электрических схем и конструкций измерителей концентрации метана, а также рекомендаций по их практическому использованию, разработка устройства непрерывного контроля  $\text{CH}_4$  для систем автоматизированного микроклимата.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- впервые разработан датчик метана на основе органического полупроводника фталоцианина магния (патент №2231052 от 20.06.2004);
- получены, исследованы, математически описаны закономерности влияния условий работы датчика концентрации метана на его электрофизические характеристики. На этой основе и с помощью математических моделей выбран оптимальный режим работы датчика  $\text{CH}_4$  для условий нефтегазового производства, а также разработаны принципы построения и схема устройства, позволяющего повысить чувствительность и точность измерения концентрации метана;
- исследованы процессы функционирования и старения разработанного датчика технических средств контроля  $\text{CH}_4$  в среде помещений нефтегазового комплекса.

**Практическая значимость** результатов исследований заключается в следующем:

- разработан измеритель концентрации метана для нефтегазового производства и устройство непрерывного контроля  $\text{CH}_4$  для систем автоматизированного микроклимата;
- повышение безопасности в производственных помещениях нефтегазового комплекса путем применения более чувствительного и точного сигнализатора метана.

#### **Основные результаты и положения, выносимые на защиту:**

- способ изготовления датчика метана на основе фталоцианина магния;
- математические модели, описывающие основные закономерности процессов функционирования датчика;
- результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований электрофизических свойств датчика  $\text{CH}_4$ , на основе которого разработаны технические средства контроля метана;
- схемы и характеристики технических средств, позволяющих повысить уровень безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса.

**Реализация результатов исследований.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке и создании газоанализатора метана и реализованы в Урдомском и Грязовецком линейных производственных управлениях магистральных газопроводов ООО «СЕВЕРГАЗПРОМ» (Республика Коми г. Ухта).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: 34-м Международном семинаре «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах» (г. Москва, 2004 г.), V-международном молодежном экологическом форуме стран балтийского региона “Экобалтика`2004” (г. Санкт-Петербург), IV-международном молодежном экологическом форуме стран балтийского региона “Экобалтика`2002” (г. Санкт-Петербург), всероссийской научно-практической конференции “Энергетика, экология, экономика средних и

малых городов. Проблемы и пути их решения” (г. Великий Устюг 2003 г.), второй всероссийской научно-технической конференции «Системы управления электротехническими объектами» (г. Тула 2002 г.), межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов «Молодые исследователи – региону» (г. Вологда 2002 г.), III региональной межвузовской научно-технической конференции «Вузовская наука – региону» (г. Вологда 2002 г.), межвузовской электронной научно-технической конференции «Электроснабжение. Новые технологии» (г. Вологда 2002 г.), международной научной конференции «Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии» (г. Кисловодск 2002 г.), региональной студенческой научной конференции «Молодые исследователи – региону» (г. Вологда 2001 г.).

**Публикации.** По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 13 печатных работ, в том числе 3 статьи в центральной печати, получен патент РФ на изобретение №2231052 от 20.06.2004.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 171 странице машинописного текста, содержит 13 таблиц, 28 иллюстраций, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, включающего 125 наименований, в том числе 30 на иностранных языках, приложений на 33 страницах.

#### **Основное содержание работы.**

Во **введении** раскрывается актуальность темы исследований, излагаются основные положения диссертации.

В **первой главе** проведен литературный обзор и обоснованы требования к техническим средствам защиты людей от производственных пожаров. Основным видом поражения, на который приходится почти 90% случаев травмирования персонала на объектах газового надзора, является отравление

продуктами сгорания (в том числе и неполного) или газом. На травмирование в результате взрывов и пожаров приходится около 10 % случаев.

Таким образом, необходимо постоянно контролировать микроклимат помещений в нефтегазовой промышленности на наличие взрывоопасных газов, одним из которых является метан.

В системах автоматизированного микроклимата, применяемых в нефтегазовом комплексе, регулирование осуществляется в основном по температуре и концентрации опасных газов. В то же время отмечается, что применяемые системы часто не обеспечивают строгого поддержания параметров микроклимата в связи с несовершенством оборудования и методик расчета, недостаточным учетом изменений технологического процесса, климатических условий, типов и размеров помещений. Разработка датчика метана, позволяющего осуществить непрерывный контроль его концентрации в производственных помещениях, способствует повышению качества контроля концентрации метана и точности поддержания параметров микроклимата, соответствует современным тенденциям в развитии комплексных систем микроклимата и позволяет повысить уровень безопасности.

Аналитическим обзором установлено, что в качестве газовых датчиков для производственных помещений нефтегазового комплекса применяются полупроводниковые химические сенсоры, обеспечивающие стабильность, надежность, жесткие условия эксплуатации, высокие точность и чувствительность, малые габаритные размеры, массу и энергопотребление, информационную, конструктивную и технологическую совместимость с микроэлектронными средствами обработки информации. Кроме того, концентрация детектируемых частиц преобразуется непосредственно в электрический сигнал, а электронная оснастка прибора представляет собой

простейшую электрическую схему.

Но используемые в нефтегазовом комплексе методы и устройства для измерения концентрации метана имеют и ряд существенных недостатков: ограниченность в применении, высокая стоимость и трудоемкость измерения, быстрое старение и высокие (до 700° С) рабочие температуры датчиков и т. д. Поэтому назрела необходимость создания нового датчика концентрации метана и технических средств контроля  $\text{CH}_4$  на его основе, лишенных перечисленных недостатков.

Согласно требованиям ГОСТ 12.1.005-88.ССБТ «...Методики и средства должны обеспечивать избирательное измерение концентрации вредного вещества в присутствии сопутствующих компонентов на уровне равном или меньшем 0,5 ПДК...». Для метана диапазон измерения должен быть вблизи нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР). В приборах обычно используется два порога срабатывания: предупредительный (он же ПДК метана равный 7000 мг/м<sup>3</sup>) – 0.1% об. и аварийный, составляющий 10% от НКПР – 0.5% об. метана.

Согласно ГОСТ 27540-87 сигнализаторы горючих газов должны измерять концентрацию горючих газов от нижнего предела взрываемости до ПДК включительно.

Необходимо разработать технические средства защиты людей, удовлетворяющие требованиям государственных стандартов и превосходящие по некоторым параметрам существующие аналоги. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

Во **второй главе** проведен теоретический анализ влияния концентрации метана и рабочей температуры датчика  $\text{CH}_4$  на его электрофизические характеристики (сопротивление и чувствительность). Рассматриваемый датчик выполнен по новой запатентованной технологии (патент №2231052 от 20.06.2004), которая позволила упростить технологически процесс

изготовления датчика и снизить его стоимость. Сущность изобретения в следующем: на ситалловую подложку с растровыми электродами из антикоррозийного сплава наносится газочувствительный слой химически очищенного фталоцианина магния толщиной не более 15 нм, который подвергается технологической активации и легированию кислородом воздуха.

В данной работе использовался синтезированный и очищенный химическими методами в Ивановской государственной химико-технологической академии фталоцианин магния (PcMg). Синтезированный PcMg содержит акцепторную примесь кислорода, который обуславливает р-тип его проводимости. Адсорбция донорного газа CH<sub>4</sub> на поверхности чувствительного материала датчика приводит к рекомбинации электрона молекулы метана и дырки, образованной примесью кислорода. В результате количество свободных носителей заряда уменьшается и, сопротивление полупроводникового датчика возрастает. Взаимодействие является обратимым. К основным допущениям, использованным в дальнейших рассуждениях (приняты на основе результатов обзора и собственных исследований), относятся: сопротивление чувствительного слоя датчика соответствует омической области поведения органического полупроводника PcMg; адсорбция метана на поверхности пленок PcMg подчиняется уравнению степенной изотермы Фрейндлиха.

Сопротивление датчика метана обратно пропорционально концентрации свободных носителей заряда:

$$R = \frac{l}{qn_p\mu_p S}, \quad (1)$$

где  $l$  - длина полупроводника (расстояние между электродами датчика);  $S$  - площадь поперечного сечения полупроводника;  $q$  - заряд электрона;  $n_p$  - концентрация дырок;  $\mu_p$  - подвижность дырок.

Сопротивление датчика в метане определяется как:

$$R_r = \frac{1}{n_p - n_d} \cdot \frac{1}{q\mu_p S}, \quad (2)$$

где  $n_d$  - концентрация свободных электронов в материале датчика, обусловленных адсорбцией и ионизацией молекул метана.

Знак минус между  $n_p$  и  $n_d$  объясняется тем, что электроны молекул метана рекомбинируют с дырками, в результате - количество свободных носителей заряда в материале датчика уменьшается.

Чувствительность датчика, т. е. отношение сопротивлений датчика в присутствии метана и без него, равна:

$$\beta = \frac{R_r}{R} = \frac{n_p}{n_p - n_d}. \quad (3)$$

Зависимость количества адсорбированных и ионизированных молекул от концентрации  $\text{CH}_4$  и рабочей температуры датчика имеет следующий вид:

$$N = N_0 e^{-\frac{\Theta}{kT}}, \quad (4)$$

где  $N_0$  - число молекул, адсорбированных на поверхности датчика при данной концентрации  $\text{CH}_4$ ;  $\Theta = 8.4 \cdot 10^{-21}$  Дж - энергия адсорбции и ионизации примеси материала датчика, определена экспериментально;  $k$  - постоянная Больцмана;  $T$  - абсолютная температура.

Число адсорбированных молекул  $\text{CH}_4$  при постоянной температуре (изотерма адсорбции) определяем как:

$$N_0 = k_a C^\gamma k_m S_d, \quad (5)$$

где  $C$  - концентрация метана;  $k_m$  - коэффициент, обратно пропорциональный массе молекулы газа;  $S_d$  - площадь поверхности датчика;  $k_a$  и  $\gamma$  - коэффициенты адсорбции материала датчика, по нашим исследованиям равны соответственно  $5.4 \cdot 10^{-11}$  и 0.1.

Уравнение (4) принимает следующий вид:

$$N = k_a k_m C \gamma S_d e^{-\frac{\Theta}{kT}}. \quad (6)$$

Концентрацию электронов  $n_d$ , обусловленных адсорбцией метана на поверхности материала датчика, усредняем по объему полупроводника и определяем по формуле:

$$n_d = \frac{N}{l \cdot S} \quad (7)$$

или с учетом (6)

$$n_d = \frac{k_a k_m S_d}{l S} C \gamma e^{-\frac{\Theta}{kT}} = k_n C \gamma e^{-\frac{\Theta}{kT}}, \quad (8)$$

где  $k_n$  - константа.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы. С ростом концентрации метана в атмосфере производственных помещений нефтегазового комплекса при постоянной рабочей температуре сопротивление датчика  $\text{CH}_4$  увеличивается. Это объясняется формулами (2) и (8), т. е. под действием адсорбции метана растет концентрация электронов, которые уменьшают проводимость, обусловленную примесями в полупроводниковом материале датчика. С ростом рабочей температуры датчика при постоянной концентрации метана его чувствительность падает, т. к. концентрация собственных носителей заряда в материале датчика растет быстрее количества электронов, обусловленных адсорбцией метана (3). Полученные выражения (2) и (3) и (8) для электрофизических параметров датчика  $\text{CH}_4$  позволяют рассчитать его сопротивление и чувствительность в зависимости от концентрации метана (в диапазоне от 0,05 до 0,5% об.) и рабочей температуры (от 50 до 70 °C).

Разработанный датчик способствует снижению пожарной опасности в помещениях нефтегазового комплекса и может являться эффективным

средством предупреждения пожаров в силу высокой чувствительности (0,05% об.) и рекордно низкой рабочей температуры (50° С).

В **третьей главе** изложена методика и результаты экспериментальных исследований условий работы датчика концентрации метана в производственных помещениях нефтегазового комплекса. Повышение качества контроля  $\text{CH}_4$  на предприятиях нефтегазового комплекса связано с детальными исследованиями влияния концентрации метана, рабочей температуры и времени воздействия  $\text{CH}_4$  на датчик. Кроме того, теоретические исследования влияния условий работы датчика метана на его электрофизические характеристики, рассмотренные во второй главе, нуждаются в экспериментальной проверке. Оценка влияния разных факторов на сопротивление и чувствительность датчика проводилась с использованием метода статистического планирования эксперимента, которому предшествовали поисковые исследования с целью выбора воздействующих факторов и обоснование уровней их варьирования. Реализован план эксперимента  $3^3$ . В качестве воздействующих факторов приняты концентрация метана, рабочая температура и время воздействия  $\text{CH}_4$  на датчик.

Экспериментальные исследования проводились с датчиком, конструкция которого приведена на рис. 1. Подложка датчика состоит из ситалловой пластины 3 размером 10x10x1 мм с изготовленными на ее поверхности методом фотолитографии встречно-штыревыми электродами 1.

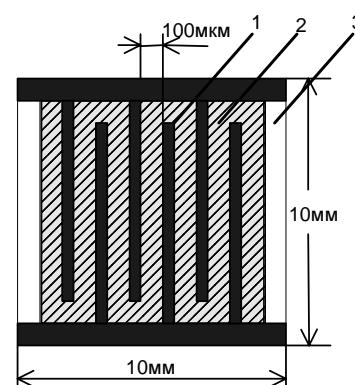


Рис. 1. Датчик газа метана.

- 1- растровые электроды;
- 2 – слой фталоцианина магния;
- 3 – ситалловая подложка.

Зазор между электродами  $a=100$  мкм, длина зазора  $L=1476$  мм, толщина (высота) слоя электрода  $h=1$  мкм. Для нанесения на подложку слоя органического полупроводника 2 использовался метод вакуумной сублимации на установке ВУП-4.

В результате проведенного полного факторного эксперимента получили следующие уравнения регрессии для сопротивления  $R$  и чувствительности  $\beta$  датчика:

$$R = 24.7 + 10.2C - 9.29t + 4.69\tau - 4.07C^2 - 1.78t^2 - 2.71\tau^2 - 5.67Ct + 2.57C\tau - 2.45t\tau - 1.23Ct\tau; \quad (9)$$

$$\beta = 12.3 + 4.34C - 1.59t + 2.15\tau - 1.87C^2 - 2.78t^2 - 1.19\tau^2 - 1.19Ct + 1.02C\tau - 0.46t\tau - 0.26Ct\tau. \quad (10)$$

Воспроизводимость результатов оценивалась по критерию Кохрена. Проверка моделей (9) и (10) по критерию Фишера подтвердила их адекватность.

Из (9) и (10) получены частные уравнения регрессии и построены зависимости сопротивления и чувствительности датчика при фиксировании факторов на различных уровнях. На рис. 2 представлены зависимости сопротивления датчика метана от времени при различных концентрациях  $\text{CH}_4$  и рабочих температурах. Сделан вывод, что время необходимое для измерения составляет 30 с.

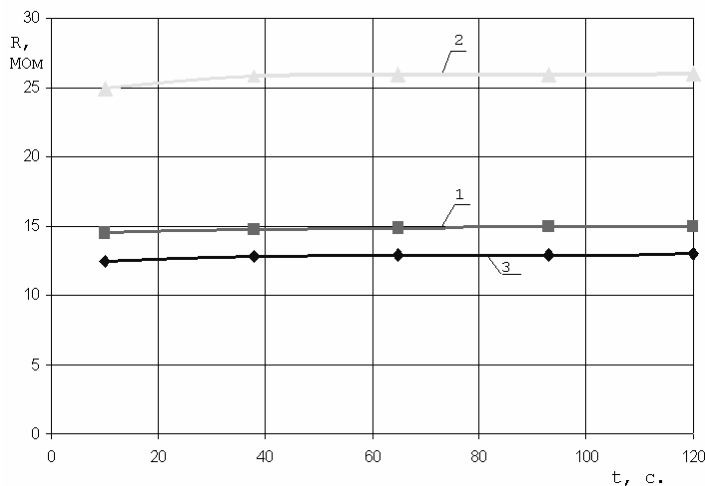


Рис. 2. Зависимости сопротивления датчика от времени при различных концентрациях метана и рабочих температурах:

1 -  $C=0,5\%$  об.,  $t=70$  °C,

$R = 14.1 + 3.58\tau - 2.71\tau^2$ ;

2 -  $C=0,28\%$  об.,  $t=60$  °C,

$R = 24.7 + 4.69\tau - 2.71\tau^2$ ;

3 -  $C=0,05\%$  об.,  $t=50$  °C,

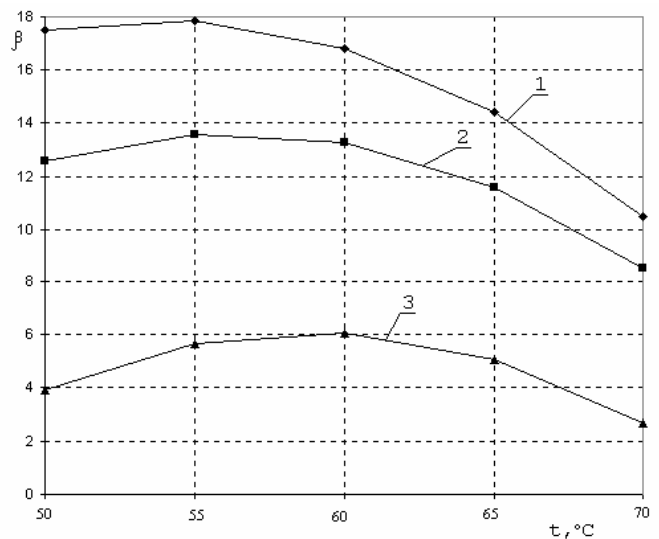
$R = 12.3 + 3.34\tau - 2.71\tau^2$ .

При изучении влияния концентрации метана и рабочей температуры на сопротивление и чувствительность датчика фактор времени фиксировали на верхнем уровне. На рис. 3 приведены зависимости чувствительности датчика  $\text{CH}_4$  от рабочей температуры при различных концентрациях метана.

Анализируя рис. 3, установили, что чувствительность датчика имеет максимум, который находится в диапазоне температур  $t=50...70$  °С.

Рис. 3. Зависимости чувствительности датчика от рабочей температуры при различных концентрациях метана:

- 1 -  $C=0,5\%$  об.,  $\tau=120$  с,  
 $\beta = 16.8 - 3.5t - 2.78t^2$ ;  
 2 -  $C=0,28\%$  об.,  $\tau=120$  с,  
 $\beta = 13.3 - 2.05t - 2.78t^2$ ;  
 3 -  $C=0,05\%$  об.,  $\tau=120$  с,  
 $\beta = 6.07 - 0.6t - 2.78t^2$



При определении оптимальных параметров работы датчика метана, которые соответствуют максимальной чувствительности, функция отклика (10) исследована на максимум, построены поверхности отклика и их горизонтальные сечения. На рис. 4 приведена одна из таких поверхностей  $\beta = f(C, t)$ . Получили максимальную чувствительность датчика  $\beta_{\max}=17.9$  при  $C=0,5\%$  об. и  $t=52$  °С.

В качестве оптимальной рабочей температуры принимаем  $t=50$  °С, т. к. чувствительность при данной температуре ( $\beta=16.8$ ) отличается от максимальной незначительно, а величина измеряемого сопротивления датчика значительно уменьшается. Исследование зависимости сопротивления датчика от концентрации метана проводилось при рабочей температуре 50 °С (рис. 5).

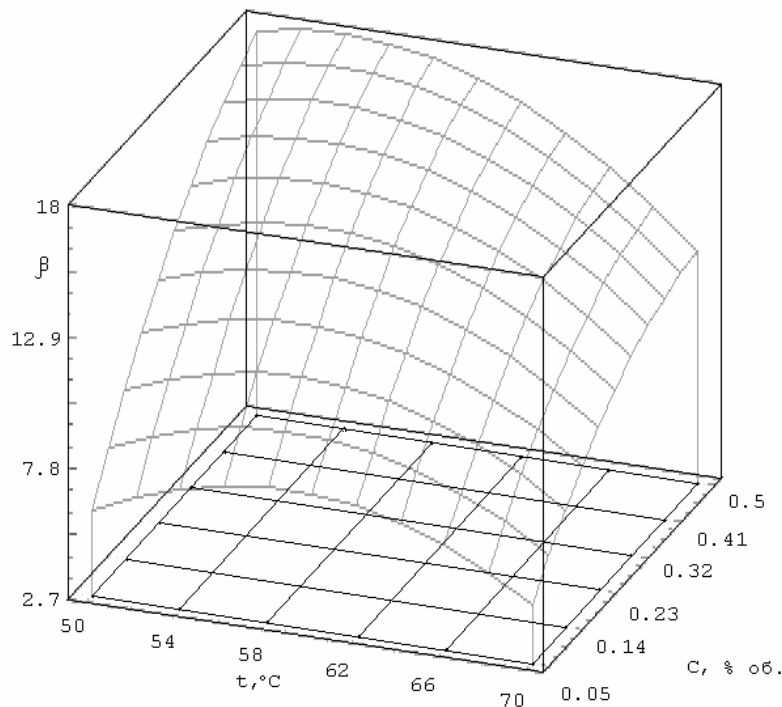
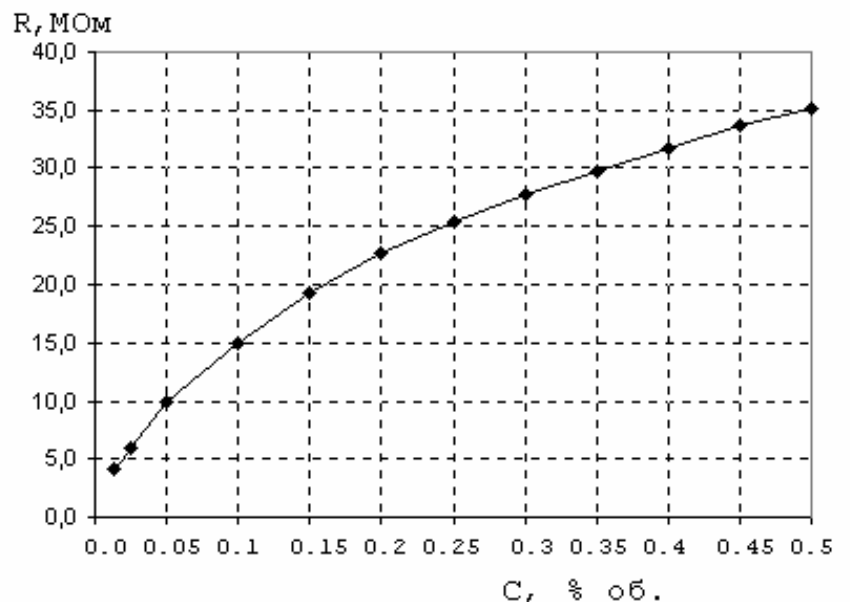


Рис. 4. Зависимость чувствительности датчика от концентрации метана и рабочей температуры:  

$$\beta = 13.3 + 5.36C - 2.05t - 1.87C^2 - 2.78t^2 - 1.45Ct$$

С целью практического применения датчика концентрации  $\text{CH}_4$  в нефтегазовом комплексе было проведено исследование его старения с помощью камеры искусственного климата при воздействии метана (концентрации от 0,05 до 0,5% об.) в течение 500 часов, различных температурах окружающей среды (от 2 до 50 °С) и влажностях воздуха (от 70 до 95 %), что соответствует параметрам среды производственных помещений нефтегазового комплекса. В результате эксперимента сопротивление датчика возросло на 2-4 %, а чувствительность уменьшилась на 1-3 %.

Рис.5. Зависимость сопротивления датчика R от концентрации метана C при  $t=50^\circ\text{C}$



Анализируя результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований влияния концентрации метана и рабочей температуры на электрофизические характеристики датчика (табл. 1, 2), отмечаем, что с учетом доверительного интервала имеет место расхождение результатов до 10 %.

Таким образом, существует удовлетворительная сходимость между теоретическими и экспериментальными значениями сопротивления и чувствительности.

Таблица 1

Сравнение теоретических и экспериментальных данных по сопротивлению датчика метана при рабочей температуре  $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

C, % об.	Сопротивление, Ом		Относительная погрешность, %
	теоретическое	экспериментальное	
0.05	$9.7 \cdot 10^6$	$9.8 \cdot 10^6$	1.0
0.16	$18.8 \cdot 10^6$	$19.3 \cdot 10^6$	2.7
0.28	$25.6 \cdot 10^6$	$26.7 \cdot 10^6$	4.3
0.39	$30.5 \cdot 10^6$	$32.1 \cdot 10^6$	5.2
0.5	$32.9 \cdot 10^6$	$35.4 \cdot 10^6$	7.6

Таблица 2

Сравнение теоретических и экспериментальных данных по чувствительности датчика метана при  $C = 0,05\%$  об.

t, $^{\circ}\text{C}$	Чувствительность		Относительная погрешность, %
	теоретическая	экспериментальная	
50	13.9	12.6	-9.4
55	13.4	13.6	1.5
60	12.8	13.3	3.9
65	11.2	11.6	3.6
70	8.1	8.47	4.6

Рабочую температуру датчика варьировали в интервале 50...70 °С. Это объясняется тем, что в этом интервале чувствительность именно к метану по данным обзора и собственных поисковых исследований максимальна. Верхняя граница - 70 °С объясняется тем, что при высоких температурах собственная проводимость чувствительного слоя датчика возрастает и влияние адсорбции метана на проводимость полупроводника становится значительно менее заметным, кроме того, начинаются процессы десорбции метана; нижняя - 50 °С - тем, что сопротивление датчика при этой температуре значительно возрастает и погрешность его измерения может достигнуть недопустимых размеров (начинает сказываться влияние сопротивления изоляции, а также электромагнитные помехи). При более низких температурах быстрое действие датчика становится недопустимым. Кроме этого, при температуре 50° С влияние влажности на характеристики датчика минимальное и позволяет пренебречь ею.

В **четвертой главе** разработаны технические средства обеспечения контроля концентрации метана в нефтегазовом комплексе, приведены их принципиальные электрические схемы, технические и метрологические характеристики. Разработанные средства учитывают специфику среды применения, как-то: окружающая среда с часто изменяющейся температурой и влажностью, недопущение возникновения искр и тления и пр. Датчик метана работает на рекордно низкой температуре (50 °С), что исключает возможность возникновения искр, кроме этого такая температура обеспечивает снижение влияния влажности на процессы, протекающие в нем. Из теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости сопротивления и чувствительности датчика от концентрации  $\text{CH}_4$ , рабочей температуры и времени измерения, кривые старения датчика. На основании этих данных разработаны измерители концентрации метана (СМ) для

предприятий нефтегазового комплекса и устройства непрерывного контроля  $\text{CH}_4$  для систем автоматизированного микроклимата.

Обобщенная структурная схема средств контроля концентрации метана представлена на рис. 6.

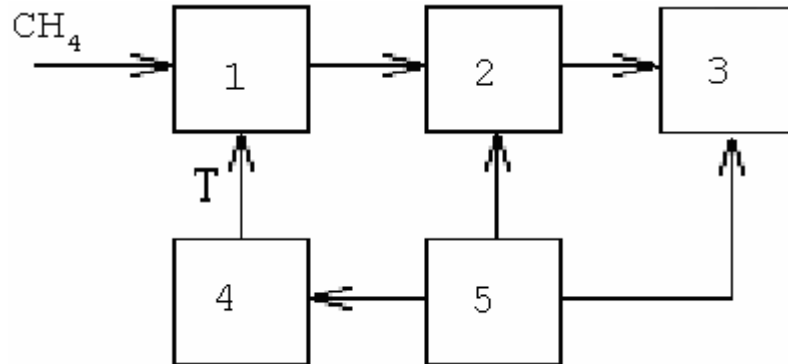


Рис. 6. Структурная схема средств контроля концентрации метана:

1 - датчик метана, 2 - преобразователь, 3 - отображающее (для измерителей СМ) или исполнительное (для систем микроклимата), 4 - стабилизатор температуры датчика, 5 - источник питания

Разработано несколько вариантов измерителя СМ с различными схемными решениями включения датчика для предприятий нефтегазового комплекса различной специализации: аналоговые измерители концентрации метана СМ-1 и СМ-2, измерители концентрации  $\text{CH}_4$  с цифровой индикацией СМ-3, СМ-4 и СМ-5. Их характеристики сведены в табл. 3.

## Характеристики измерителей концентрации метана

Показатель	СМ	СМ-2	СМ-3	СМ-4	СМ-5
Пределы измерения концентрации СН <sub>4</sub> , % об.	0,1..0,5	0,1..0,5	0,05..0,5	0,05..0,5	0,05..0,5
Рабочая температура датчика, °С	50	50	50	50	50
Время, необходимое на измерение, мин.	6	4	3	1	0,5
Погрешность измерения, %	30	20	15	20	15
Потребляемая мощность (не более), Вт	25	10	5	6	0,5
Габаритные размеры, мм	200x200x140	200x200x140	180x180x120	180x180x120	110x60x15
Масса, кг	3	3	2	2	0,2
Стоимость лабораторного образца, руб.	2100	4150	6230	12500	15197

На рис. 7 приведена принципиальная электрическая схема устройства непрерывного контроля и регулирования концентрации метана релейного типа для системы автоматизированного микроклимата. Она включает: измерительный мост R1-R4 с датчиком метана R2, усилитель на микросхеме DA1, компаратор DA2 и сигнальный светодиод V2 (исполнительное устройство - реле K1, пускатель K2, двигатель привода вентилятора M1). Блок питания устройства и стабилизатор температуры датчика СН<sub>4</sub> не показаны. При превышении концентрации метана нормы загорается V2 (включается двигатель M1).

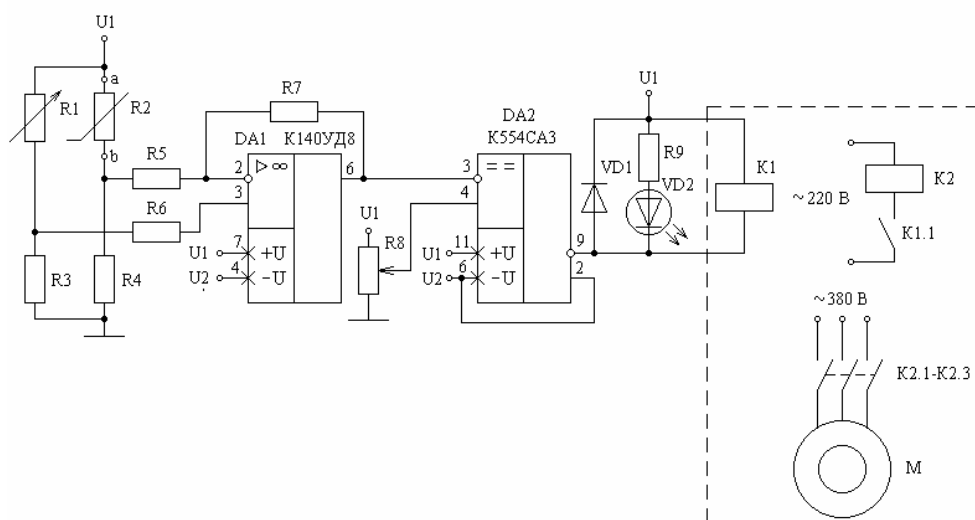


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема системы контроля и регулирования концентрации метана

Рабочие условия эксплуатации средств контроля метана: температура от -40 до +40 °С; относительная влажность до 95 % (при отсутствии конденсации); атмосферное давление от 86 до 106 кПа; напряжение сети 220 В от -15 до +10 % частотой  $50 \pm 1$  Гц.

В пятой главе определена технико-экономическая эффективность применения средств контроля метана в нефтегазовом комплексе. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения разработанных технических средств контроля метана составил 2882,01 руб.

### **Заключение.**

В диссертационной работе представлено новое решение актуальной научной задачи – повышение уровня пожарной безопасности на предприятиях нефтегазового комплекса путем разработки более совершенного сигнализатора метана на основе чувствительного датчика изготовленного с использованием органического полупроводника.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. По уникальной технологии (патент №2231052 от 20.06.2004) разработан датчик метана, отличающийся рекордно низкой рабочей температурой (50 °С) и простотой изготовления. Датчик позволил улучшить качество контроля метана за счет высокой чувствительности и простоты измерения (концентрация  $\text{CH}_4$  определяется посредством измерения активного сопротивления чувствительного слоя датчика).

2. Получены математические модели, устанавливающие количественные связи между электрофизическими характеристиками датчика метана и условиями его работы в среде помещений нефтегазового комплекса. Сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей показали совпадение результатов в пределах 10 %.

3. По итогам исследований влияния условий работы на электрофизические характеристики датчика  $\text{CH}_4$  определены оптимальные параметры его функционирования в среде помещений нефтегазового комплекса: рабочая температура +50 °С, время установления показаний не более 30 с. При испытании датчика в течение года концентрациями метана в диапазоне  $C=0.05-0.5\%$  об. дрейф его параметров - сопротивления и чувствительности в пределах погрешности измерения – 10%, что свидетельствует о незначительной деградации структуры в результате старения.

4. Разработано несколько вариантов схем простого и удобного в эксплуатации газосигнализатора, позволяющего осуществлять экспресс-анализ метана и повысить точность измерения его концентрации. Разработано устройство контроля метана для систем автоматизированного микроклимата, позволяющее реализовать непрерывный контроль  $\text{CH}_4$  в атмосфере помещений и повысить эффективность работы кондиционирующих установок. С учетом погрешностей датчика и схемы прибора суммарная погрешность устройства не превышает  $\pm 25\%$ , что соответствует требованиям нормативных документов.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Патент 2231052 Кл G01 N 27/12. А.В. Ударатин, М.И. Федоров. Способ изготовления тонкопленочного датчика для определения концентрации метана в газовой среде / ВоГТУ (Россия): Заявл. 07.10.2002. Оpubл. 20.06.2004. Бюл. №17.

2. Ударатин А.В., Федоров М.И. Газовый сенсор на основе фталоцианина магния. Электроснабжение. Новые технологии: Доклады межвузовской электронной научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ. - 2003. - С. 53-55.

3. Ударатин А.В. Датчик пропан-бутана на основе Рс-Sn-Рс. Молодые исследователи – региону: Материалы межрегиональной научной конференции студентов и аспирантов. - Вологда: ВоГТУ.- 2002. - С. 38-40.

4. Ударатин А.В. Исследование датчика концентрации метана ДГП-1. Молодые исследователи – региону: Тезисы докладов региональной студенческой научной конференции. - Вологда: ВоГТУ. - 2001. - С. 36-37.

5. Ударатин А.В. Сигнализатор метана для безопасности персонала в российской энергетике // Безопасность жизнедеятельности. - №9. - 2004. – С. 35-37.

6. Ударатин А.В., Бабкин А.Н., Федоров М.И. Газовые сенсоры на основе органических полупроводников. IX-международный молодежный экологический форум стран балтийского региона “Экобалтика`2002”. Сборник тезисов статей. Под ред.: Васильева Ю.С., Голубева Д.А., Данилевича Я.Б., Федорова М.П. – Санкт-Петербург: СПбГПУ. – 2002. – С. 74-76.

7. Ударатин А.В., Федоров М.И. Датчики природного газа на основе органических полупроводников. Вузовская наука – региону: Материалы III региональной межвузовской научно-технической конференции. - Вологда: ВоГТУ. - 2002. - С. 409-410.

8. Ударатин А.В., Федоров М.И. Измеритель концентрации газа метана // Приборы и техника эксперимента. - 2003. - №3. - С. 400-401.

9. Ударатин А.В., Федоров М.И. Измеритель концентрации метана // Сенсор. 2003. -№1. - С. 50-51.

10. Ударатин А.В., Федоров М.И. Металлфталоцианин в датчике природного газа. Всероссийская научно-практическая конференция “Энергетика, экология, экономика средних и малых городов. Проблемы и пути их решения”. Материалы / Федеральное государственное унитарное предприятие “Всероссийский научно-исследовательский институт межотраслевой информации – федеральный информационно-аналитический центр оборонной промышленности”. - 2003. – С. 250-252.

11. Ударатин А.В., Федоров М.И. Низкотемпературный сенсор метана, как часть системы безопасности персонала в топливно-энергетическом комплексе РФ. Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Материалы докл. науч.-техн. семинара (Москва, 9-11 декабря 2003 г.). М.: МНТОРЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 2004. - С. 147-152.

12. Ударатин А.В., Федоров М.И. Новое в датчиках газа на основе органических полупроводников. Вторая всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления электротехническими объектами». – Тула: ТулГУ. - 2002. - С. 24-25.

13. Ударатин А.В., Федоров М.И. Сигнализатор метана для мониторинга окружающей среды в системе охраны труда. V-международный молодежный экологический форум стран балтийского региона “Экобалтика`2004”. Санкт-Петербург, 16-18 июня 2004 г. Сборник тезисов статей. Под ред.: В.Ю. Рудь, С. 49.

14. Федоров М.И., Мелкоян Ш.Р., Ударатин А.В. Тонкопленочные солнечные элементы и датчики газов на основе органических полупроводников / Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии. Тезисы докладов международной научной конференции, Кисловодск, 13-18 октября 2002. Ставрополь: СевКавГТУ. - 2002. – С. 125-128.