

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	7
1.1. Взрывоопасность горных выработок угольных шахт. Анализ причин возникновения аварий и аварийных ситуаций шахт	7
1.2. Особенности формирования взрывоопасных смесей при аварийных загазованиях горных выработок шахт	12
1.3. Анализ существующих способов и средств контроля взрывоопасности газовых смесей	19
Выводы	33
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОЗНАЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ	36
2.1. Особенности работы термокаталитических датчиков при высоких концентрациях метана	36
2.2. Методика экспериментальных исследований однозначности определения содержания метана термокаталитическими датчиками	41
2.3. Результаты экспериментальных исследований однозначности определения содержания метана термокаталитическими датчиками	43
2.4. Исследование инверсии выходного сигнала термокаталитических датчиков метана	49
2.5. Исследование сдвига выходного сигнала датчиков метана в область положительных значений	61
2.6. Исследование неоднозначности характеристик датчиков метана в области высоких его концентраций	64
2.7. Исследование провала выходной характеристики в области взрывных концентраций	67
2.8. Исследование временной стабильности существующих средств контроля содержания метана	76
Выводы	79
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ МЕТАНА В АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ	81
3.1. Экспериментальные исследования термокаталитических датчиков метана после их длительной работы в шахтных условиях	81
3.2. Исследование процессов накопления продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов	86
3.3. Исследования работоспособности анализаторов метана в многокомпонентных газовых смесях	98
Выводы	102
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНА В ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ	104
4.1. Исследования причин нестабильности нулевых показаний термокаталитических датчиков	104

4.2. Термокаталитическое окисление горючих газов при неограниченной диффузии контролируемой среды	108
4.3. Термокаталитическое окисление горючих газов при сильном ограничении диффузии контролируемой среды	114
Выводы	115
ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОДНОЗНАЧНОСТИ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЕ	116
5.1. Повышение стабильности нулевых показаний термокаталитических датчиков.....	116
5.2. Улучшение временной стабильности термокаталитических датчиков.....	121
5.3. Совершенствование метода измерения и конструкции термокаталитических датчиков	124
5.4. Разработка методов и средств, обеспечивающих однозначность контроля содержания метана	138
5.5. Диагностика стационарных средств контроля метана	147
Выводы	150
ГЛАВА 6. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ МЕТАНА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АНАЛИЗАТОРОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ ЗАГАЗИРОВАНИЯХ	152
6.1. Обоснование способа контроля с использованием термокаталитического датчика метана с неодинаковыми электротепловыми параметрами чувствительных элементов	152
6.2. Разработка и обоснование способа контроля с использованием двухкамерного термокаталитического датчика метана.....	162
6.3. Обоснование конструкции и режимов работы термоэлементов двухкамерного датчика.....	167
6.4. Обоснование конструктивных и технологических параметров датчиков метана.....	171
Выводы	177
ГЛАВА 7. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ МЕТАНА ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ	180
7.1. Лабораторные исследования датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов.....	180
7.2. Лабораторные исследования двухкамерных термокаталитических датчиков метана	186
7.3. Техническая реализация разработанных средств контроля.....	190
7.4. Направления дальнейшего совершенствования средств контроля взрывоопасности газовых смесей	196
Выводы	199
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	202
ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	204

ВВЕДЕНИЕ

Сложные горно-геологические условия угольных месторождений Украины обуславливают наличие большого количества опасных и вредных производственных факторов, которые приводят к высокому уровню травматизма, профзаболеваний и аварийности в отрасли. Основными видами подземных аварий являются пожары, обрушения, взрывы метановоздушных смесей и угольной пыли.

Одним из наиболее опасных видов аварий на угольных шахтах являются взрывы метана и угольной пыли. Несмотря на то, что среди всех видов аварий число взрывов не превышает 4%, последствия и ущерб, вызываемый этими явлениями, сопоставимы с последствиями от таких наиболее распространенных видов аварий, как пожары. Примером таких аварий являются взрывы, прогремевшие на шахте им. А.Ф.Засядько в конце 2007 г., которые привели к гибели более ста горнорабочих и горноспасателей, а их материальные последствия исчисляются миллиардами гривен.

Большинство шахт в Украине являются опасными по газу и пыли. По мере исчерпания запасов полезных ископаемых на действующих шахтах в отработку вовлекаются пласты угля расположенные на большой глубине, что сопровождается увеличением газовыделения. К росту газовыделения, увеличению концентраций метана и пыли в горных выработках ведет также внедрение высокопроизводительной техники и увеличение угледобычи из одного забоя. Кроме того, в связи с дефицитом энергоресурсов, все больше внимания уделяется использованию шахтного метана, как энергетического сырья, что сопряжено с добычей, транспортировкой и утилизацией метановоздушных смесей, способных переходить во взрывоопасное состояние при наличии подсосов воздуха, возникающих вследствие разрушения горного массива и нарушения герметичности дегазационного оборудования. Все это сопряжено с увеличением потенциальной опасности газирования и вероятности возникновения взрыва.

Одним из важнейших мероприятий, направленных на предупреждения взрывов, является контроль состава рудничной атмосферы и оборудование шахт средствами автоматической газовой защиты, срабатывающей при недопустимой концентрации метана.

Обеспечение надежного и однозначного контроля взрывоопасности горных выработок шахт является одной из наиболее актуальных для угольной отрасли задач. Неоднозначность срабатывания средств контроля метана может привести к ошибочному включению машин и механизмов при наличии взрывоопасной концентрации метана. Случаи неоднозначности срабатывания автоматической газовой защиты наблюдаются при концентрации метана свыше 5 %. Учитывая это, нормативными документами была заложена норма по однозначности срабатывания газовой защиты. Однако до последнего времени в существующих средствах контроля это требование в полной мере не было выполнено по причине недостаточной изученности причин возникновения явления неоднозначности и отсутствия соответствующих технических решений.

Разработке способов и средств контроля взрывоопасности посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. В последнее время исследования ученых Национального горного университета, НПО «Красный металлист», МакНИИ, выполненные в этой области, позволили существенно улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики средств контроля взрывобезопасности, повысить надежность и стабильность их работы, в значительной мере решить вопросы обеспечения однозначности измерения содержания метана во всем диапазоне его возможных концентраций. Однако до настоящего времени наблюдаются случаи нарушения работоспособности существующих термокаталитических газоанализаторов при аварийных загазованиях горных выработок шахт. В ряде случаев, например при пожарах и внезапных выбросах угля, породы и газа, когда существенно изменяется газовый состав рудничной атмосферы и у горных выработках образуются газовые смеси с высокой концентрацией метана, когда кроме метана в этих смесях в значительных количествах присутствуют его высшие гомологи, водород и оксид углерода существующие анализаторы оказываются неработоспособными, что затрудняет принятие решений, направленных на спасение людей и ликвидацию аварии. Причины отказов и нарушений в достаточной мере не выяснены, что не позволяет вести разработку эффективных решений по их предотвращению.

Вышеприведенное обуславливает актуальность проведения исследований направленных на повышение надежности контроля взрывоопасности газовых смесей при аварийных загазованиях горных выработок шахт.

Решению этих актуальных задач и посвящена данная монография.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Взрывоопасность горных выработок угольных шахт. Анализ причин возникновения аварий и аварийных ситуаций

Сложные горно-геологические условия угольных месторождений Украины обуславливают наличие большого количества опасных и вредных производственных факторов, которые обуславливают высокий уровень травматизма, профзаболеваний и аварийности в отрасли. Основными видами подземных аварий являются пожары, обрушения, внезапные выбросы и взрывы метановоздушных смесей и угольной пыли.

В последние годы доля пожаров в общей аварийности на угольных шахтах Украины составляют 35-40% от общего числа аварий [1]. Аварии, связанные с обрушениями пород, составляют 30-40%. Взрывы метановоздушных смесей и угольной пыли составляют в среднем 8%. Однако, несмотря на сравнительно небольшую долю взрывов в общей аварийности, последствия и ущерб, вызываемый этими явлениями, являются весьма значительными и сопоставимыми с последствиями от наиболее распространенных видов аварий [1].

В Украине из всех действующих шахт 90% являются опасными по газу метану [2], а 60% по взрывам угольной пыли (рис. 1). За последние годы наиболее масштабные аварии, связанные со взрывами газа и пыли произошли на шахтах им. Баракова (2000 г., погибло 80 чел.), им. Скочинского (1998 г. - 64 чел.), им. Засядько (2007 г. – 105 чел., 2001 г. – 56 чел., 1999 г. - 39 чел.), им. XIX Партсъезда (1998 г. - 24 чел.).

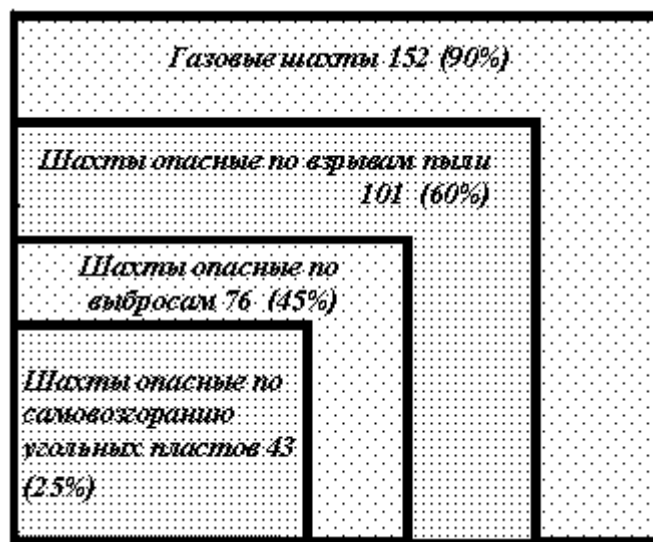


Рис. 1.3. Горно-геологические условия шахт Украины [2]

Кроме аварий на угольных шахтах часто возникают аварийные ситуации, которые при определенных условиях могут перерасти в аварии с тяжелыми последствиями. Так, в последнее время на угольных шахтах ежегодно возникает

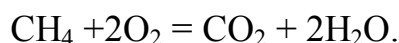
до 50 аварийных ситуаций к ликвидации которых привлекаются подразделения ГВГСС. Основная часть таких ситуаций связана с загазированием горных выработок шахт и возникновения опасности взрыва образовавшейся метановоздушной смеси.

Взрывоопасная ситуация может возникнуть при скоплении такого количества горючего вещества, которое, в смеси с воздухом, образует взрывчатую концентрацию, и при наличии источника высокой температуры, способного воспламенить горючее вещество.

В шахтных условиях причинами появления высокой температуры могут служить неисправности в электрооборудовании или его эксплуатация в условиях, не отвечающих виду изготовления, ведение взрывных работ, искры, возникающие от трения режущего инструмента, появление открытого огня (курение, сварка, пожар) и др. [1,2].

Взрывом называют воспламенение, сопровождающееся ударной волной. Быстрый рост давления во фронте пламени, передаваемого от слоя к слою, рождает ударную волну, распространяющуюся перед фронтом пламени со скоростью звука (330 м/с). В угольных шахтах наиболее часто происходят взрывы метана [3,4].

Метан CH_4 - газ не имеющий запаха, вкуса и цвета. Относительная плотность составляет 0,554, в связи с чем, возможны сосредоточения метана в верхних частях подземных выработок. Коэффициент диффузии метана в 1,6 раз больше, чем у воздуха, вследствие чего он легко проникает через пористые перегородки. Химически метан весьма инертный и может соединяться лишь с галлоидами. Метан в смеси с воздухом горит и взрывается. В зависимости от соотношения концентраций метана и кислорода в воздухе возможны различные виды их реакций при взрыве [5]. Взрыв максимальной силы соответствует стехиометрической концентрации метана 9,5% и происходит согласно реакции



Нижним концентрационным пределом взрывчатости метана (НПВ) обычно принято считать 5% (рис 1.2), а верхним пределом взрывчатости (ВПВ) - 16% [6]. При иных равных условиях наиболее легко загорается смесь воздуха с метаном при его содержании 7...8%.

Температура воспламенения метана составляет 650...750 °С. Она зависит от таких факторов, как концентрация метана, температура среды, состав воздуха, атмосферное давление, вид и мощность источника воспламенения. Для метана характерно свойство взрываться под влиянием высокой температуры не сразу, а с некоторым опозданием через определенный промежуток времени, так называемый инкубационный период. Продолжительность этого периода зависит от температуры источника воспламенения и концентрации метана. Так, при температуре источника 775 °С и содержании метана 12% продолжительность инкубационного периода составляет 1,64 с, а при температуре 1075 °С и содержании 6% - 0,039 с.

Если в воздухе присутствует взрывоопасная угольная пыль, то взрывная смесь может образоваться и при концентрации метана 2...3%. Присутствие в

воздухе кроме метана других взрывных газов (например, этана, ацетилена, водорода и др.) снижает нижнюю границу взрыва смеси.

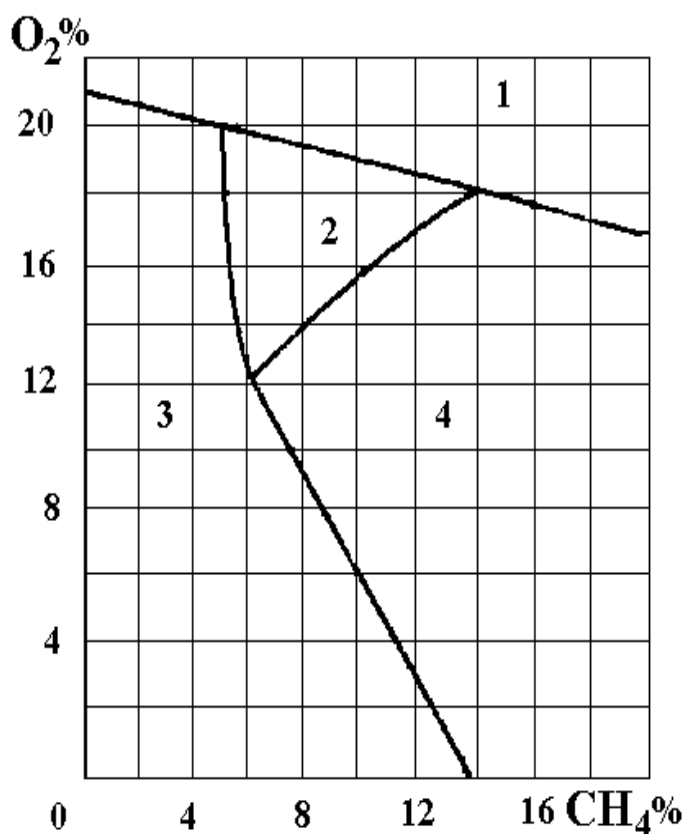


Рис. 1.2. Объемные пределы взрываемости метановоздушных смесей:

1 – неосуществимая смесь; 2 – взрывчатая смесь; 3 – невзрывчатая смесь; 4 – смесь, могущая стать взрывчатой при добавлении воздуха (кислорода)

В этом случае нижняя граница взрыва смеси определяется по формуле Ле-Шателье [5]

$$C_c = \frac{100}{\frac{C_1}{N_1} + \frac{C_2}{N_2} + \dots + \frac{C_n}{N_n}} \quad (1.1)$$

где C_1, C_2, \dots, C_n - соответственно концентрация каждого горючего компонента в смеси, % ($C_1 + C_2 + \dots + C_n = 100\%$);

N_1, N_2, \dots, N_n - соответственно нижняя граница взрывчатости горючего компонента, %.

Степень взрывчатости угольной пыли зависит от количества витающей пыли, ее дисперсного и вещественного состава, наличия в атмосфере горючих газов, влажности пыли и атмосферы [6].

Пыль угольных пластов наиболее взрывчата при диаметре до 60 мкм. Концентрационные пределы взрывчатости угольной пыли зависят от марок углей и в первую очередь связаны с выходом летучих [7-9]. Нижний предел взрывчатости взвешенной в воздухе пыли для каменных углей составляет 20 –

При соблюдении установленных регламентов обслуживания отказ средств автоматического газового контроля (АГК) или несрабатывание сигнализации о наличии недопустимой концентрации метана может происходить по причинам:

- недостаточной надежности аппаратуры АГК или сигнализаторов;
- изменения чувствительности термокatalитических средств контроля в результате термического перегрева чувствительных элементов или отравления катализатора;
- несанкционированного вмешательства в работу средств защиты;
- неоднозначности срабатывания средств контроля метана;
- отсутствие средств контроля во всех потенциально опасных местах.

Недостаточная надежность используемых на шахтах технических средств контроля метана в первую очередь обусловлена применением физически и морально устаревших типов средств, которые выработали свой ресурс. Это объясняется кризисным состоянием угледобывающей отрасли и отсутствием средств для приобретения нового и своевременной замены отработавшего установленные сроки оборудования и приборов.

Изменения чувствительности термокatalитических средств контроля в результате термического перегрева чувствительных элементов обусловлено тем, что при применении платино-палладиевых катализаторов и γ - окиси алюминия для изготовления чувствительных элементов в существующих датчиках концентрация метана $C_{ма}=1\%$ об. вызывает прирост температуры кatalитически активного (рабочего) элемента на 20 - 30 °С [30,31]. Это обеспечивает сравнительно высокую чувствительность датчиков, но при высоких концентрациях метана вызывает ускоренное старение чувствительного элемента, нелинейность датчика и часто приводит к потере чувствительности датчика. К этому же ведет отравление катализатора различными примесями рудничного воздуха, которые в значительном количестве образуются при пожарах и взрывных работах, например серосодержащими газами.

Несанкционированное вмешательство в работу средств АГК с целью невыполнения функции по отключению оборудования при превышении допустимых концентраций метана в горных выработках чаще всего проявляется в закорачивании или шунтировании линий связи между датчиками и аппаратами сигнализации и принудительном ограничении диффузии контролируемой среды к чувствительным элементам датчиков. При разработке анализаторов метана АТ1-1 и АТ3-1 проблема обнаружения случаев закорачивания или шунтирования линий связи была в определенной мере решена, однако случаи несанкционированного вмешательства в работу средств АГК в настоящее время продолжают наблюдаться (заливка газодиффузионного фильтра водой, заворачивание датчиков метана в мокрую одежду и т.п.)

Неоднозначности срабатывания средств контроля метана может привести к ошибочному включению машин и механизмов при наличии взрывоопасной концентрации метана. Случаи неоднозначности срабатывания автоматической газовой защиты наблюдаются при концентрации метана свыше 5%. Учитывая это, ГОСТ 24032-80 [54] была заложена норма по однозначности срабатывания

газовой защиты. В соответствии с требованиями ГОСТ предусматривались испытания метанометров на однозначность показаний или срабатывания отключающего устройства. Однако до последнего времени в существующих средствах контроля это требование в полной мере не было выполнено по причине недостаточной изученности причин возникновения явления неоднозначности и отсутствия соответствующих технических решений.

Отсутствие контроля во всех потенциально опасных местах обусловлено ограниченным количеством средств контроля метана на шахтах. Как правило, на газовых шахтах не охвачена значительная часть потенциально опасных мест, где возможно образование взрывоопасных концентраций, особенно местных и слоевых скоплений метана. Очевидно, обеспечить контроль метана во всех потенциально опасных местах средствами АГК весьма трудно и практически невозможно по экономическим соображениям. Поэтому, учитывая то, что особую опасность представляют места возможного скопления метана, в которых находятся горнорабочие и где выполняются работы способные привести к возникновению условий для воспламенения метана, необходимо расширять область применения индивидуальных сигнализаторов метана, в частности совмещенных с головными светильниками.

1.2. Особенности формирования взрывоопасных смесей при аварийных загазованиях горных выработок шахт

Аварии, связанные с воспламенением метана, в зависимости от характера протекания явления и последствий, принято делить на три группы: взрывы, вспышки и горение [1,7,8]. Взрыв – это быстрое сгорание метано-воздушной смеси, сопровождающееся выделением большого количества энергии и образованием ударной воздушной волны, способной вызывать разрушения или повреждения горных выработок, сооружений, оборудования и механические травмы людей. Вспышка – это быстрое сгорание сравнительно небольшого объема метано-воздушной смеси без динамического воздействия на окружающую среду. Граница между взрывом и вспышкой несколько условна. К взрывам обычно относят воспламенения, при которых избыточное давление воздуха превышает 0,01 МПа, что создает опасность возникновения травм у горнорабочих [7].

Взрывы метановоздушных смесей и пыли составляют в среднем 3% от общего числа аварий. Однако, несмотря на сравнительно небольшую часть взрывов в общей аварийности, последствия и ущерб, вызываемый этими явлениями, являются весьма значительными и сопоставимыми с последствиями от наиболее распространенных видов аварий [9]. За последние 30 лет в угольных шахтах Украины произошло более 100 взрывов и зарегистрировано около 300 случаев вспышек метана [1].

Значительно чаще, чем указанные аварии, на угольных шахтах возникают аварийные ситуации, которые, при определенных условиях, могут перерасти в аварии с тяжелыми последствиями. Основная часть таких ситуаций возникает в результате загазования горных выработок шахт и возникновения опасности взрыва образовавшейся метановоздушной смеси.

Анализ обстоятельств взрывов метана на угольных шахтах Украины, выполненных МакНИИ [10], показал, что наибольшее число взрывов (до 35%) происходит в подготовительных выработках, проветриваемых вентиляторами местного проветривания ВМП. Загазирование таких выработок чаще всего возникает из-за нарушений проветривания (остановка ВМП, отставание и дефекты вентиляционных труб, рециркуляция воздуха при работе ВМП и др.) и внезапного выделения метана в выработки, вызванное газодинамическими явлениями, особенно часто возникающие при сотрясательном взрывании.

При нарушении проветривания, например остановке ВМП, или порыве вентиляционных труб, время загазирования выработок и величина максимальной концентрации метана в выработке зависит от параметров выработки и интенсивности газовыделения [7,12,13]. При этом максимальная концентрация метана в тупиковой выработке может достигать десятков процентов (до 30-40 об.%), а время загазирования до максимальной концентрации составляет десятки минут.

Загазирования призабойных участков выработок при взрывных работах по углю обуславливается интенсификацией выделения метана из отбитого угля. При недостаточной подаче воздуха вследствие повреждения вентиляционных труб или другим причинам в призабойной части выработки может возникать взрывоопасная концентрация метана [2]. Характерное изменение дебита и концентрации метана в призабойном пространстве тупиковой выработки после взрывания зарядов по углю приведено на рис. 1.3 [2].

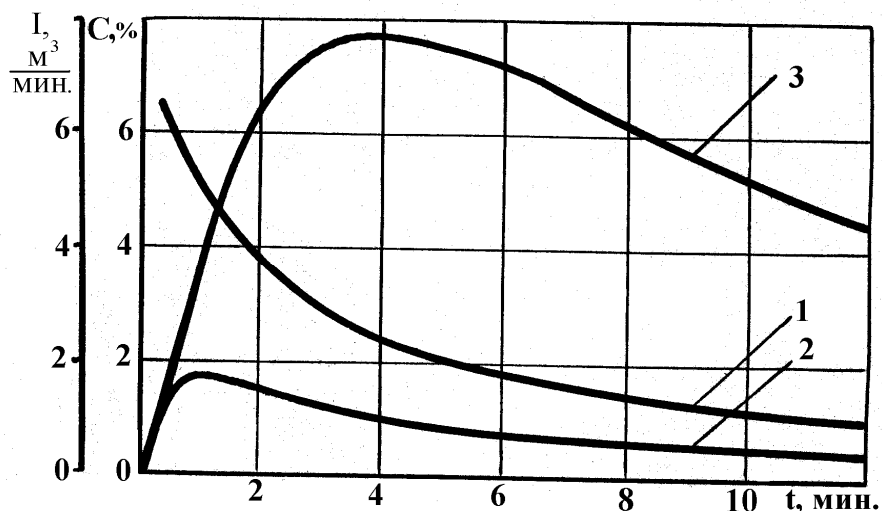


Рис. 1.3. Изменение дебита и концентрации метана в призабойном пространстве тупиковой выработки после взрывания зарядов по углю: 1 – дебит; 2 и 3 – концентрация при расходе воздуха соответственно 320 и 30 м³/мин.

При остановке ВМП, несмотря на отсутствие принудительного проветривания тупиковой выработки, концентрация метана в ней не достигает 100 об.% из-за ограниченной скорости газовыделения и выноса метана из выработки за счет естественного проветривания: диффузионных процессов и появления двух

медленно текущих противоточных потоков, рассредоточенных по высоте выработки, обусловленных разностью температур в устье выработки и у забоя.

Загазирование подготовительных выработок, вызванное внезапным выделением метана в результате газодинамических явлений, протекает значительно быстрее, а максимальная концентрация метана в части выработки прилегающей к груди забоя за считанные секунды может достигать 100 об.% [14,15]. В зависимости от параметров выработки, объема газовыделения и наличия принудительного проветривания такая концентрация метана может наблюдаться от нескольких минут до десятков минут с последующим ее снижением в результате выноса метана из выработки.

Результаты моделирования загазирования проветриваемой подготовительной выработки, при газодинамическом явлении, выполненного в [14,15], приведены на рис. 1.4.

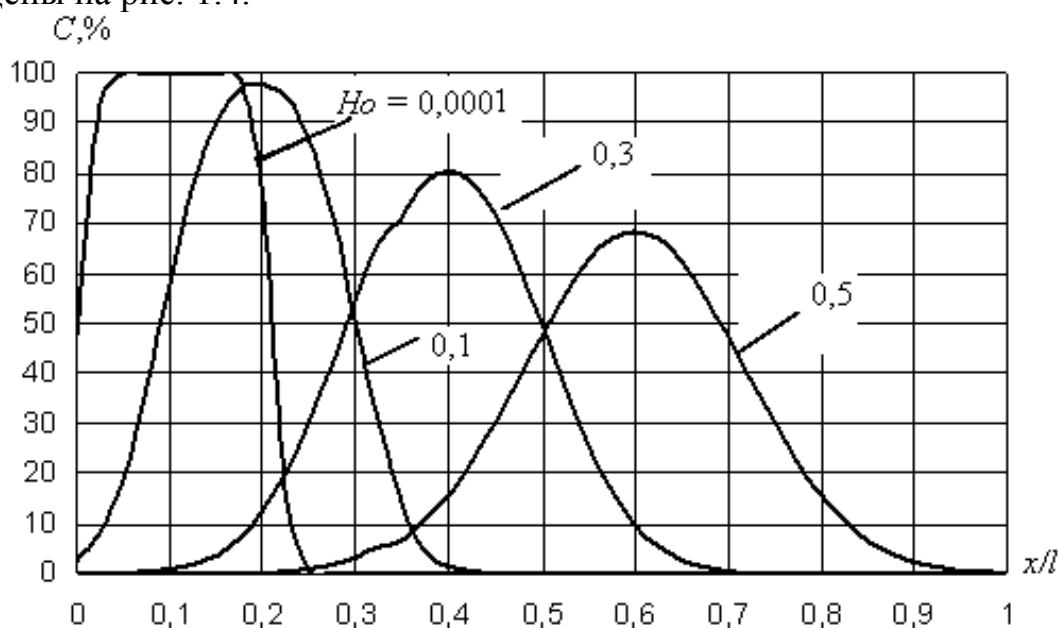


Рис. 1.4. Распределение концентрации метана в проветриваемой тупиковой выработке в различные промежутки времени после выброса газа

На приведенном рисунке использованы следующие обозначения:

$Ho = \frac{nkQ_0t}{Sl}$ - критерий кратности обмена воздуха на выемочном участке;

n – эмпирический коэффициент неравномерности распределения по высоте выработки скорости воздуха и концентрации метана на период переходного процесса;

k - коэффициента уменьшения расхода воздуха после выброса;

Q_0 – расход воздуха на выемочном участке в нормальном режиме вентиляции, m^3/c .

S – средняя площадь поперечного сечения загазированной выработки, m^2 ;

l - длина первоначальной загазированной зоны, м;

x - расстояние от груди забоя, м.

Результаты моделирования распределения концентрации метана в тупиковой выработке в различные промежутки времени после выброса породы, угля и

газа и отключения ВМП, выполненного в [14,15], приведены на рис. 1.5. На данном рисунке $Fo = D_x t / l^2$, где D_x - коэффициент турбулентной диффузии, m^2/c .

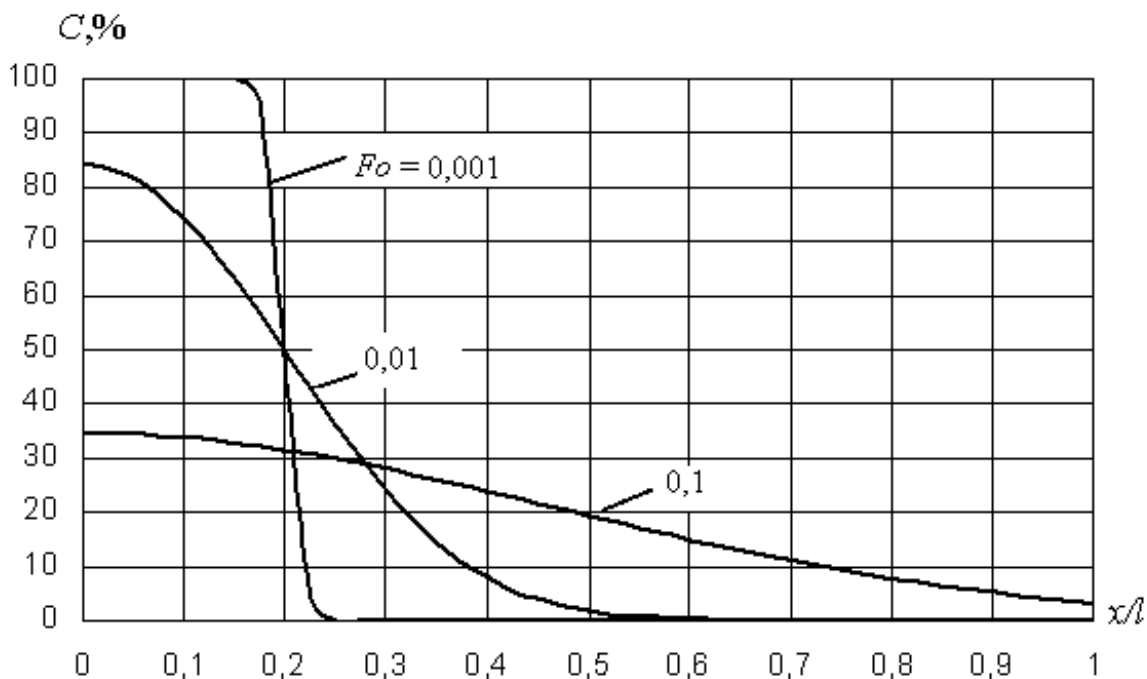


Рис. 1.5. Распределение концентрации метана в тупиковой выработке после выброса породы, угля и газа и отключения ВМП [15]

В течение всего времени загазирования тупиковых выработок, которое может длиться от десятков минут до нескольких суток, датчики стационарных газоанализаторов, установленные у груди забоя, в местах возможного возникновения слоевых скоплений метана и даже у устья подготовительной выработки [16] работают при высокой концентрации метана, которая может составлять десятки процентов.

Количество взрывов в очистных выработках и в выработках исходящих из очистных забоев и панелей шахт составляет соответственно 28,5% и 23% [10]. Образование взрывчатой смеси в этих выработках главным образом происходит при нарушениях проветривания вентиляторами главного проветривания (ВГП), связанных с увеличением сопротивления воздушной струе (завалы, возведение перемычек и др.), образованием застойных зон и местных скоплений в них метана, накоплением метана в выработанных пространствах, а также при внезапных выделениях метана в результате газодинамических явлений.

Моделирование процессов загазирования в очистных выработках и в выработках исходящих из очистных забоев при газодинамических явлениях, проведенное в [17,18], показало, что при отсутствии завалов концентрация метана в лаве после выброса достигает 100 об.%, а на в выработках исходящих из очистных забоев в месте установки датчиков газоанализаторов длительное время может достигать десятков процентов (рис. 1.6).

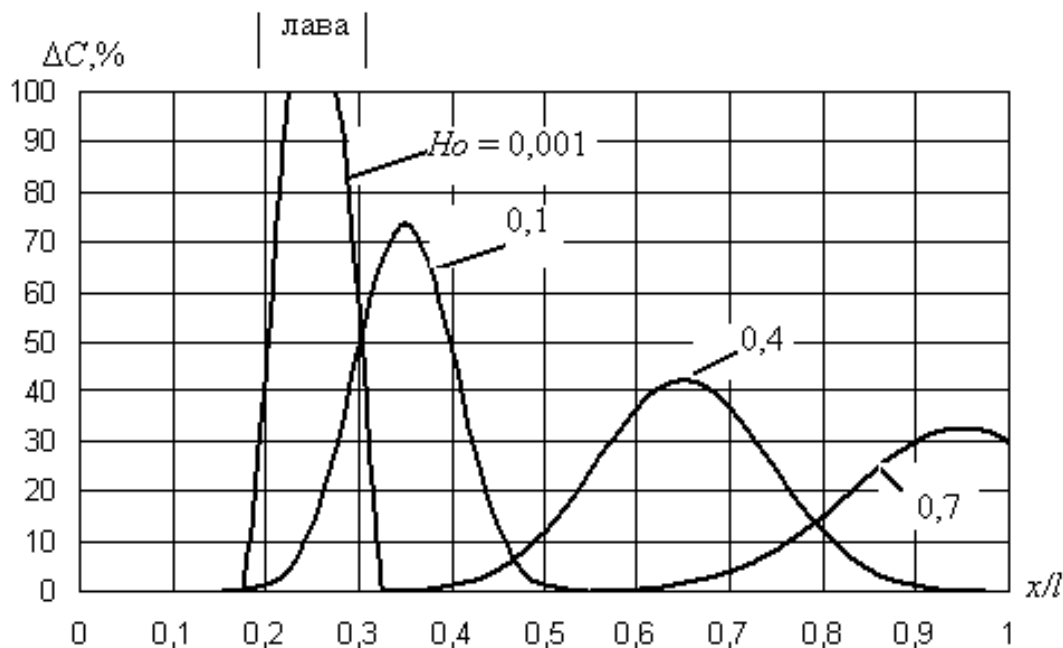


Рис. 1.6. Распределение концентрации метана в выработках выемочного участка в различные промежутки времени после выброса газа [18]

При наличии завалов, которые приводят к существенному снижению расхода воздуха через очистную выработку, время загазирования при внезапном выбросе увеличивается и может достигать нескольких часов. Кроме того, в результате сокращения расхода воздуха, вызванного перекрытием части поперечного сечения выработки выброшенной массой породы и угля, на выемочном участке возникнет переходной газодинамический процесс [17]. При изменении режима вентиляции газовыделение на выемочном участке не восстанавливается на протяжении нескольких часов и даже суток. Как показали данные наблюдений [19,20] при сплошной системе разработки между кратностью изменения расхода воздуха и концентрацией метана в исходящей струе лавы существует линейная зависимость, приведенная на рис. 1.7. За кратность здесь принималась величина обратная коэффициенту уменьшения расхода воздуха.

Из рис. 1.6 видно, что при начальной концентрации метана близкой к недопустимым значениям, например $C_0 = 1$ об.%, и значительной кратности изменения расхода воздуха аварийное загазирования в выработках исходящих из очистных забоев может достигать значительной величины (до 10 об.%) и длиться в течение всего времени ликвидации завала и восстановления нормального режима проветривания выемочного участка. Кроме того, уменьшение расхода воздуха приводит к образованию слоевых скоплений метана в вентиляционной выработке, начиная от окна лавы. При этом концентрация метана в слоевом скоплении и его длина зависят от числа Ричардсона [21]

$$Ri = \frac{g \frac{\Delta\rho}{\rho} I_{cn} \cos \alpha}{bu^3}, \quad (1.3)$$

где g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$);

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

$\Delta\rho$ – разность между плотностью воздуха и плотностью метана, кг/м³;

α – угол наклона выработки к горизонту, град.

u – средняя скорость воздушного потока, м/с;

b – ширина выработки, м;

$I_{сл}$ – дебит метана, образующего слой метана в выработках, примыкающих к выработанному пространству, м³/с.

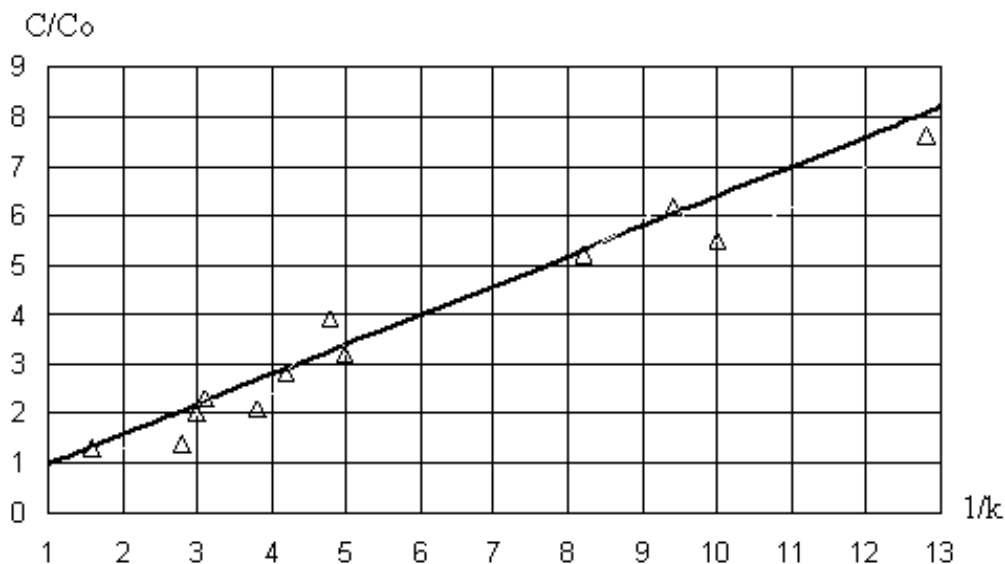


Рис. 1.7. Зависимость ожидаемой концентрации метана в исходящей струе лавы от кратности изменения расхода воздуха [20].

Дебит метана, образующего слой метана в выработках, примыкающих к выработанному пространству, ориентировочно равен $I_{сл} = 0,4 \cdot I_{в-л}$, где $I_{в-л}$ – дебит метана в лаву из выработанного пространства, м³/с.

При больших числах Ричардсона концентрация метана в слоевом скоплении может в несколько раз превышать среднюю концентрацию метана в выработке, а длина скоплений достигает сотен метров [21,22]. Датчики газоанализаторов, контролирующих местные скопления метана, в таких случаях в течение всего времени ликвидации завалов должны работать при концентрациях метана, достигающих десятков процентов.

Общеизвестно влияние на взрывчатые свойства метановоздушных смесей газообразных примесей, содержащихся в рудничном газе [4]. Наличие таких примесей изменяет границы взрывчатости смеси [23]. Нижняя граница взрывчатости смеси обычно определяется по формуле Ле-Шателье (1.1).

Наибольшее содержание примесей в рудничном газе наблюдается при разработке угольных пластов ранней и средней стадий метаморфизма. С увеличением глубины разработки содержание примесей увеличивается. В табл. 1.1 приведены составы рудничных газов, отобранных из скважин на шахтах Донбасса и рассчитанные пределы горючести газовой смеси с воздухом [25].

Таблица 1.1

Содержание горючих газов в смесях, отобранных со скважин

Шахта	Содержание газов, %					Пределы горючести, %	
	водород	метан	этан	пропан	бутан и др.	нижний	верхний
ПО «Макеевуголь»							
Бутовская-Глубокая	0,25	94,0	4,65	0,74	0,344	5,10	14,80
Игнатьевская	0,00	98,0	1,50	0,19	0,046	5,23	14,99
Игнатьевская	0,00	95,0	4,12	0,445	0,086	5,12	14,86
ПО «Донецкуголь»							
№29	0,18	97,0	1,64	0,477	0,235	5,19	14,90
№29	0,14	97,3	1,64	0,477	0,235	5,18	14,92
Кировская	0,00	97,0	1,62	0,320	0,197	5,18	14,90
Кировская	0,00	95,0	3,33	0,885	0,400	5,09	14,83
№4-21	0,09	95,0	3,45	1,01	0,365	5,03	14,75
№4-21	0,10	94,6	3,89	1,02	0,378	5,05	14,75

Из приведенных в табл. 1.1 данных видно, что в отдельных случаях концентрация высших гомологов метана в смеси газов достигает до 5 %, а кроме того, во многих отобранных пробах рудничного газа в небольших количествах присутствует водород (до 0,25 %). С учетом этого, при нормальных условиях работы газоанализаторов и контроле местных скоплений метана с недопустимой концентрацией 2,0 об.% [26] максимальная концентрация высших гомологов метана в газоздушном смеси может достигать до 0,1 об.%, а при работе в аварийных условиях и контроле концентраций в области верхнего предела взрываемости (при 20 об.% метана) их концентрация может достигать до 1 об.%, и более. Доминирующей примесью во всех смесях является этан.

Одним из наиболее часто встречающихся видов аварий, приводящих к тяжелым последствиям, являются рудничные пожары [1,11]. В среднем на угольных шахтах Украины ежегодно случается до 70 пожаров, к ликвидации которых привлекаются подразделения ГВГСС [11]. Наибольшее число экзогенных пожаров возникает в выработках оборудованных конвейерами, а также в результате воспламенения оболочек силовых кабелей. Эндогенные пожары возникают в основном в выработанном пространстве действующих и остановленных очистных забоев. Пожарные газы, распространяющиеся по горным выработкам, могут существенно изменить состав атмосферы в месте установки газоанализаторов. В зависимости от режима горения и вида горючего вещества продукты горения кроме углекислого газа в значительном количестве могут содержать [11,27] оксид углерода, водород, сернистый ангидрид и др. Содержания оксида углерода и водорода в рудничном воздухе при пожарах достигает до 2,0 об.%, а иногда и больше [27]. Анализируемая смесь в этом случае содержит три горючих компонента, и ее взрывчатые свойства возрастают.

Наиболее существенные изменения газового состава наблюдаются в изолированном участке горных выработок при тушении сложных развившихся пожаров методами изоляции [11]. В этом случае существенно снижается содержание кислорода в смеси, а кроме указанных ранее газов в ней могут присутствовать непредельные углеводороды, продукты термического разложения горючих веществ и материалов. Взрывчатые свойства таких смесей обычно зависят от содержания кислорода.

Для управления процессом тушения изолированных пожаров необходимо постоянно контролировать газовую ситуацию в заперемеченном пространстве. В настоящее время такой контроль осуществляют путем отбора проб и последующего их лабораторного анализа или с помощью шахтных хроматографов, а существующие стационарные газоанализаторы в такой ситуации оказываются неработоспособными. Это снижает оперативность принятия решений и в целом эффективность ликвидации пожара.

1.3. Анализ существующих способов и средств контроля взрывоопасности газовых смесей

Все существующие способы контроля содержания взрывоопасности газовых смесей основаны на различии физико-химических свойств взрывоопасных газов и других неконтролируемых компонент рудничной атмосферы [28,29]. Некоторые свойства горючих газов и газов, влияющих на результаты измерения, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Физико-химические свойства газов

Наименование величины	Единицы измерения	Значение величин для газов					
		воздух	CH ₄	C ₂ H ₆	H ₂	CO	CO ₂
Плотность	кг/м ³	1,293	0,717	1,357	0,0899	1,25	1,977
Удельная теплота сгорания	Дж/Кмоль	-	892·10 ⁶	1562·10 ⁶	287·10 ⁶	283·10 ⁶	-
Коэффициент диффузии	м ² /с	-	19,6·10 ⁻⁶	11,6·10 ⁻⁶	66·10 ⁻⁶	19,2·10 ⁻⁶	13,9·10 ⁻⁶
Коэффициент преломления		1,000292	1,000441	1,000696	1,000138	1,000334	1,000450
Теплопроводность	Вт/(м К)	2,4·10 ⁻²	3,1·10 ⁻²	1,8·10 ⁻²	17,9·10 ⁻²	2,35·10 ⁻²	1,4·10 ⁻²
Теплоемкость	КДж/(Кмоль К)	29,15	39,82	51,9	28,76	28,47	45,2
Температура самовоспламенения	°С	-	645	472	510	610	-
Нижний предел взрываемости	об. %	-	5	3,2	4	12,5	-
Верхний предел взрываемости	об. %	-	15	12,5	75,2	74,2	-
Длины волн при максимальном поглощении	мкм	-	3,31; 7,7	-	25	2,37; 4,65	2,7; 4,2; 15

Общим свойством всех горючих газов, которое отличает их от остальных примесей воздуха, является их теплотворная способность. Метан, водород, этан, оксид углерода и другие горючие газы, присутствующие в рудничной атмосфере, могут окисляться кислородом воздуха. Среди всех горючих газов метан отличается наиболее высокой температурой воспламенения, что обусловлено относительно высокой прочностью связей атомов в молекуле метана. Высшие гомологи метана, характеризуются значительно меньшей температурой воспламенения, чем метан, причем с увеличением числа атомов углерода температура все более снижается. Так, температура воспламенения этана почти на 200 °С ниже чем у метана. Более низкую температуру имеют также непредельные углеводороды, оксид углерода и водород.

Как видно из табл. 1.1, взрывчатые свойства газовых смесей, образующихся в горных выработках угольных шахт, в основном определяются содержанием метана, а наличие других взрывоопасных газов несущественно влияет на пороги взрываемости смесей. Поэтому, традиционно, разработка средств контроля взрывоопасности атмосферы горных выработок шахт сводилась к разработке средств контроля метана. Наличие других горючих компонентов, ввиду их незначительного содержания в газовой смеси при контроле в области нижнего предела ее взрываемости, при оценке работоспособности газоанализаторов и определении их метрологических характеристик обычно не учитывалось [30,31]. Среди других компонентов, влияющих на взрывчатые свойства смеси и показания газоанализаторов, достаточное внимание уделялось лишь углекислому газу и водяному пару.

Среди свойств метана, которые существенно отличают его от воздуха и углекислого газа, следует выделить его малую плотность, большую теплопроводность и теплоемкость, коэффициент преломления света, длины волн, соответствующие максимальному поглощению, скорость распространения звука и др. Многообразие отличительных свойств метана определило и значительное количество существующих способов контроля его концентрации.

Одним из способов контроля содержания метана в рудничной атмосфере, нашедшим широкое применение при разработке анализаторов эпизодического действия, явился рефрактометрический метод [30,32], основанный на отличии коэффициентов преломления света в метане и воздухе.

Из невзрывчатых примесей на смещение интерференционной картины существенное влияние оказывает диоксид углерода, а также пары воды. В газоанализаторах эпизодического действия, например в шахтных интерферометрах, это влияние устраняется путем предварительного осушения анализируемого воздуха и поглощения CO_2 химическим известковым поглотителем.

Горючие примеси также влияют на смещение интерференционной картины. Этан и другие гомологи метана, имеющие значительно больший коэффициент преломления, чем метан, завышают показания газоанализаторов, причем чувствительность таких анализаторов к этану почти в три раза выше, чем к метану. Учитывая то, что нижний предел взрываемости смеси этана с воздухом в полтора раза ниже, чем у метановоздушной смеси, такой рост чувствительности приводит к появлению дополнительной погрешности при оценке взрывоопас-

ности смеси. Водород имеет значительно меньший коэффициент преломления, чем метан. Его наличие в газовой смеси снижает нижний предел взрываемости смеси и в тоже время приводит к уменьшению показаний рефрактометрических анализаторов метана, что приводит к недооценке взрывоопасности смеси.

К достоинствам рефрактометрического способа относится его малая инерционность. Однако реализовать это преимущество способа в стационарных газоанализаторах чрезвычайно сложно, из-за необходимости защиты оптических элементов от загрязнения, а учитывая определенные сложности, связанные с устранением влияния на показания таких анализаторов изменения влажности и содержания углекислого газа, стационарные рефрактометрические газоанализаторы не нашли широкого применения в шахтной метанометрии.

Среди оптических способов, на основе которых разрабатывались шахтные газоанализаторы, следует в первую очередь выделить оптический абсорбционный способ [33,34]. Этот способ основан на избирательном поглощении лучистой энергии газами в инфракрасной части спектра. Длины волн при максимальном поглощении инфракрасного излучения метаном составляют 3,31 и 7,7 мкм.

Оптический абсорбционный способ характеризуется высокой избирательностью и малой инерционностью. На основе этого способа велись разработки средств контроля метана для быстродействующей газовой защиты (обладающих малой инерционностью). Избирательность оптических абсорбционных газоанализаторов к метану обеспечивалась или за счет применения избирательных оптико-акустических лучеприемников или путем использования источников монохроматического излучения с длиной волны соответствующей максимуму поглощения метана [30,31]. В первом случае, из-за необходимости применения сложных оптико-акустических лучеприемников, газоанализаторы являются достаточно сложными изделиями, имеют большие габариты и характеризуются относительно высоким энергопотреблением, кроме того, необходимость защиты оптических элементов от загрязнения существенно увеличивает их инерционность. Последний недостаток характерен также и для газоанализаторов с источниками монохроматического излучения, кроме того, разработка таких анализаторов длительное время была затруднена ввиду отсутствия дешевых и достаточно стабильных источников монохроматического излучения с требуемыми длинами волн.

Наиболее широкое применение при создании стационарных газоанализаторов и переносных сигнализаторов метана нашел термokatалитический метод контроля, который заключается в беспламенном сжигании метана на поверхности катализатора и измерении количества выделившегося при этом тепла [29,30].

В современных анализаторах метана в качестве первичных преобразователей обычно используются термokatалитические датчики, состоящие из двух элементов – рабочего (активного) и сравнительного. Элементы, имеющие одинаковые геометрические размеры и электрические параметры, обычно располагают в общей реакционной камере. Такое техническое решение позволяет уменьшить влияние неизмеримых компонентов и изменения параметров анализируемой среды на погрешность измерения.

Подвод реагирующих на поверхности рабочего элемента газов и отвод от него продуктов реакции обуславливается наличием градиента концентраций газов между поверхностью элемента и объемом реакционной камеры. Реакционная камера первых термокаталитических датчиков представляла собой цилиндр из двойной металлической сетки, имеющий внутренний диаметр около 15 мм и высоту 15-20 мм [32]. При нормальных условиях работы такого термокаталитического датчика подвод реагирующих газов и отвод от него продуктов реакции осуществлялся за счет диффузии и конвекции, а теплообмен элементов с анализируемой смесью осуществлялся за счет теплопроводности и конвективного теплопереноса.

Конструкция термокаталитических датчиков, изготавливаемых в настоящее время, как в Украине, так и за рубежом, имеет значительно меньшие габариты. Реакционная камера выполняется из керамики или металлокерамики с внутренним диаметром 5-6 мм. Для исключения теплового влияния рабочего и сравнительного элементов друг на друга они разделены экраном, т.е. эффективный диаметр камер, в которых расположены элементы, будет не более 3 мм, что практически исключает свободную конвекцию. Доставка компонентов анализируемого воздуха и теплообмен со средой в таких датчиках осуществляется за счет диффузии и теплопроводности как в кондуктометрических датчиках.

Чувствительные элементы современных датчиков имеют вид миниатюрного шарика из γ -оксида алюминия внутри которого находится спираль из платиновой проволоки, которая одновременно выполняет функции нагревательного элемента и термометра сопротивления. Поверхность каталитически активного элемента покрывается платино-палладиевым катализатором. Рабочий и компенсационный элементы включают, как правило, в одно из плеч мостовой измерительной схемы [29,30].

Реакция окисления горючих газов на гетерогенных катализаторах может происходить в кинетической и диффузионной областях [35].

Скорость реакции окисления в кинетической области обычно представляют как функцию объемно-молярных концентраций метана и кислорода

$$\omega = kF_9 f(C_{CH_4}, C_{O_2}), \quad (1.4)$$

где ω - скорость реакции, моль/с; k - константа скорости реакции, c^{-1} ; F_9 - активная поверхность катализатора, m^2 .

Величина k не зависит от концентрации метана в воздухе и возрастает при повышении температуры

$$k = Z \exp(-E / RT), \quad (1.5)$$

где Z - предэкспоненциальный множитель; E - энергия активации, Дж/моль; R - универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T - абсолютная температура, К.

Как видно из приведенных выражений в кинетической области скорость реакции окисления зависит от вида и температуры катализатора, а также концентрации реагирующих компонентов. Для платино-палладиевого катализатора эта область характерна вплоть до 350–360 °С. Окисление метана при этом сопровождается одновременной адсорбцией кислорода и метана поверхностью

катализатора, а на скорость реакции влияет не только концентрация метана, но и концентрация кислорода в атмосфере, что затрудняет получение сигнала пропорционального содержанию метана.

По мере роста температуры катализатора скорость химической реакции существенно возрастает и на активной поверхности катализатора образуется нулевая концентрация лимитирующего компонента и некоторый дефицит компонента, который находится в избытке в газовой смеси. Скорость реакции, а, следовательно, и количество образующегося тепла в этом случае определяется скоростью диффузии лимитирующего компонента, которым при обычных условиях работы газоанализаторов является метан. Принято считать, что для платино-палладиевого катализатора диффузионная область наступает при температурах более 360 °С.

При контроле дозрывных концентраций метана в диапазоне 0 – 5 об.% CH_4 количественные значения теплофизических параметров метано-воздушной смеси являются близкими к значению для чистого воздуха, а при более высоких концентрациях метана они могут существенно отличаться. Наиболее существенны при этом изменения теплопроводности и теплоемкости смеси, а также ее диффузионных характеристик. Кроме того, при концентрации метана свыше 9% лимитирующим компонентом в смеси, определяющим скорость реакции, становится окислитель – кислород воздуха. Так как при загазировании горных выработок вместе с метаном в рудничный воздух могут поступать другие газы (например, азот, углекислый газ, высшие гомологи метана) то концентрация метана и кислорода в этом случае связаны неоднозначно. Указанные обстоятельства не позволяют с необходимой точностью контролировать концентрацию метана термокаталитическим методом в диапазоне 0 – 100 об.% CH_4 . Поэтому основной областью применения этого метода является контроль дозрывных концентраций метана и чаще всего в диапазоне 0 – 5 об.% CH_4 .

Кроме относительно небольшого диапазона измеряемых концентраций, к недостаткам термокаталитического метода следует отнести возможность перегрева и выхода со строя чувствительных элементов при длительном воздействии высоких концентраций метана, влияние на результаты измерения изменения сопротивления газодиффузионных фильтров и каталитической активности элементов в результате длительной эксплуатации, нестабильность «нуля» анализаторов при изменении температуры окружающей среды, газового состава и питающего напряжения, относительно большую (в сравнении с оптическим и ультразвуковым методами) инерционность средств контроля, основанных на термокаталитическом методе.

В работе [36], указывается на то, что в области концентраций метана от 40 до 100 об.% у термогрупп сбалансированных при 0 и 100 об.% наблюдается существенное смещение выходного сигнала в отрицательную сторону, что возможно только при каталитической активности сравнительного элемента более высокой чем рабочего.

Для исследованных термогрупп в области высоких концентраций метана в работе [36] предложено ввести зону неоднозначности показаний термокаталитических датчиков метана (рис. 1.8). Кроме того, в работе указывается на то,

что после работы датчиков в газовой среде с концентрацией метана более 10 об.% существенно меняются их характеристики, что требует или защиты датчиков от газовых перегрузок или проверки стабильности их работы в нормальных условиях эксплуатации.

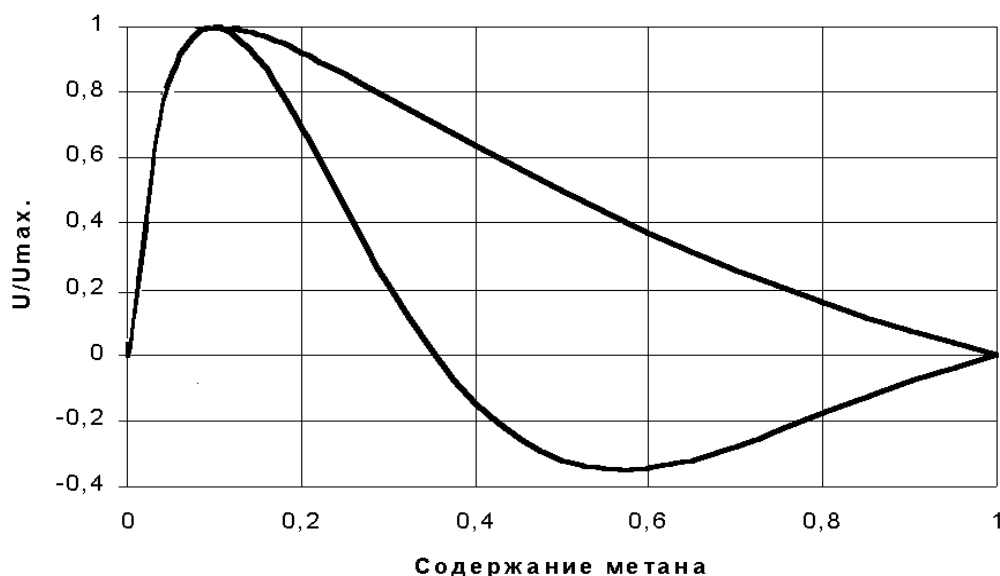


Рис. 1.8. Поле значений выходных сигналов термокаталитических датчиков метана [36]

Не вдаваясь в анализ причин приведенной нестабильной работы термокаталитических датчиков в области высоких концентраций, отметим, что все имеющиеся результаты исследований указывают на то, что контроль термокаталитический способ может быть использован только для контроля до взрывных концентраций метана. Как правило, диапазон измерения термокаталитических газоанализаторов составляет 0-5 об.% метана, а верхним пределом измеряемых концентраций для данного типа анализаторов можно считать концентрацию до 8 об.% метана. При более высоких концентрациях метана можно на протяжении небольшого периода времени обеспечить однозначность работы газовой защиты, однако получить достоверные результаты о содержании метана или интегральную оценку взрывоопасности среды ввиду неоднозначности выходных характеристик термокаталитических датчиков в этой области концентраций невозможно.

Следует также отметить, что при концентрации метана свыше 9% лимитирующим компонентом в смеси, определяющим скорость реакции, становится окислитель — кислород воздуха. Так как при загазировании горных выработок вместе с метаном в рудничный воздух могут поступать другие газы (например, углекислый газ, азот, высшие гомологи метана) то концентрация метана и кислорода в этом случае связаны неоднозначно, что также затрудняет использование термокаталитического способа для контроля высоких концентраций метана.

Указанные выше причины не позволяют с необходимой точностью контролировать концентрацию метана термокаталитическим способом в диапазоне 0–100 об.% метана. Поэтому основной областью применения этого способа яв-

ляется контроль дозрывных концентраций метана и чаще всего в диапазоне 0-5 об.% метана.

Для контроля высоких концентраций метана в настоящее время в основном используют термокондуктометрический способ, основанный на отличии теплопроводности метана и воздуха. Этот способ является одним из самых распространенных способов газового анализа. Известны случаи применения термокондуктометрического способа также и для контроля дозрывных концентраций метана. Так в угольных шахтах СССР в пятидесятые годы прошлого столетия широко использовались переносные газоанализаторы метана эпизодического действия ГМТ-3 [30]. Вследствие того, что при контроле низких концентраций метана термокatalитический способ обеспечивает существенно большую чувствительность и избирательность, эти газоанализаторы в последующие годы были вытеснены термокatalитическими.

Термокондуктометрические датчики, наиболее часто применяемые в практике газового анализа, обычно содержат газопроницаемую рабочую камеру и герметизированную сравнительную камеру с эталонным газом, в которых установлены идентичные термоэлементы, включенные в мостовые измерительные схемы [38,39]. Следует отметить, что существующим термокондуктометрическим газоанализаторам присущ ряд недостатков, заключающихся, прежде всего, в существенном влиянии на результаты измерения неконтролируемых компонентов газовой смеси, изменяющих ее теплопроводность, в том числе углекислого газа, водорода, паров воды. Кроме того, из-за различного характера температурной зависимости коэффициентов теплопроводности контролируемой и эталонной газовой среды, на результаты измерения может оказывать влияние температура, а из-за наличия конвективного теплообмена и давление среды.

Обычно при теоретической оценке погрешностей датчиков теплопроводности от неизмеряемых компонентов для шахтных условий эксплуатации исходят из того, что теплопроводность смеси подчиняется аддитивному закону, а электрические свойства молекул и влияние отличия молекулярных масс компонентов не учитывается [40]. Теплопроводность бинарной метано-воздушной смеси в таком случае определяется выражением

$$\lambda_{см} = C_m \lambda_m + (1 - C_m) \lambda_v, \quad (1.6)$$

где $\lambda_{см}, \lambda_m, \lambda_v$ - коэффициенты теплопроводности соответственно газовой смеси, метана и воздуха, Вт/м К; C_m - мольная доля метана в смеси.

Выражение (1.4) является линейным, однако оно не является строгим даже для смесей неполярных газов, какими являются метан и воздух. Для таких смесей рекомендуют при расчетах теплопроводности использовать формулу Брокау [41], которая для смеси метана и воздуха имеет вид

$$\lambda_{см} = 0,5 \left[C_m \lambda_m + (1 - C_m) \lambda_v + \frac{\lambda_m \lambda_v}{\lambda_v C_m + \lambda_m (1 - C_m)} \right]. \quad (1.7)$$

Для смесей, компоненты которых значительно отличаются по молекулярной массе (т.е. содержат водород или гелий) или полярности (т.е. содержат пары воды) характерно существенное отклонение теплопроводности от аддитивного закона [42,43]. Для расчета теплопроводности такой смеси газов, исходя из теплопроводности компонентов, рекомендуют использовать формулу Васильевой [42,43], которая дает хорошая сходимость результатов расчета и экспериментальных исследований теплопроводности газовых смесей

$$\lambda_{см} = \frac{\lambda_1}{1 + A_{12} \frac{x_2}{x_1} + A_{13} \frac{x_3}{x_1} + \dots} + \frac{\lambda_2}{1 + A_{21} \frac{x_1}{x_2} + A_{23} \frac{x_3}{x_2} + \dots} + \dots, \quad (1.8)$$

где $\lambda_{см}$ - коэффициент теплопроводности смеси, Вт/м·°С; $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ - коэффициенты теплопроводности компонентов смеси, Вт/м·°С; x_1, x_2, \dots - мольные (объемные) доли компонентов смеси; A_{12}, A_{13}, A_{21} - коэффициенты, зависящие от природы газов, образующих смеси.

Значения коэффициентов A определяют по формуле Сатерленда, скорректированной Линдсеем и Бромлеем:

$$A_{12} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\frac{\mu_1 \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{0,75} \left(1 + \frac{C_1}{T} \right)}{\mu_2 \left(1 + \frac{C_2}{T} \right)} \right]^{0,5} \right\}^2 \frac{1 + \frac{C_{12}}{T}}{1 + \frac{C_2}{T}}, \quad (1.9)$$

где μ_1, μ_2 - вязкость чистых газовых компонентов, м²/с; M_1, M_2 - молекулярные массы; C_1, C_2 - постоянные в уравнении Сатерленда (можно принять $C \approx 1,5T_{кип}$, где $T_{кип}$ - температура кипения, К); $C_{12} = f\sqrt{C_1 C_2}$, причем оба газа полярные или оба неполярные и $f=0,733$, если один газ состоит из неполярных молекул, а второй - из сильно полярных.

При расчетах средняя температура смеси в камере датчиков теплопроводности определяется по формуле

$$t_{см} = \frac{t_э + t_c}{2}, \quad (1.10)$$

где $t_э$ - температура термоэлемента, °С; t_c - температура стенок камеры, °С.

С учетом приведенных выражений в [44] выполнен расчет теплопроводности различных многокомпонентных смесей и рассчитана теоретическая относительная погрешность измерения метана датчиком теплопроводности при изменении содержания водяного пара от нуля до максимально возможного содержания паров воды, принятого исходя из условий эксплуатации рудничных газоанализаторов равным 6 об.%, а также при изменении содержания углекислого газа от нуля до 2 об.% при разных температурах нагрева чувствительных элементов. Данные выполненных расчетов приведены в табл. 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3

Теоретическая приведенная погрешность измерения концентрации метана от паров воды при их содержании 6 об.%.

Температура элемента, °С	Приведенная погрешность измерения при объемной части метана, %							
	0,01	0,02	0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
60	2,41	2,25	2,16	1,83	1,47	1,18	0,96	0,86
120	2,2	2,17	2,09	1,79	1,45	1,20	0,99	0,90
210	2,57	2,55	2,46	2,10	1,72	1,44	1,21	1,11
320	3,68	3,64	3,54	2,99	2,46	2,06	1,80	1,62

Таблица 1.4

Теоретическая приведенная погрешность измерения концентрации метана от углекислого газа при его содержании 2 об.%.

Температура элемента, °С	Приведенная погрешность измерения при объемной части метана, %							
	0,01	0,02	0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
60	-3,37	-3,34	-3,32	-3,15	-2,95	-2,78	-2,61	-2,55
120	-2,78	-2,77	-2,75	-2,60	-2,43	-2,26	-2,14	-2,08
210	-2,19	-2,17	-2,15	-2,02	-1,83	-1,75	-1,64	-1,61
320	-1,57	-1,57	-1,54	-1,45	-1,35	-1,26	-1,17	-1,14

Как видно из табл. 1.4, пары воды завышают показания анализатора метана. Максимальная приведенная погрешность измерения метана датчиком теплопроводности при содержании паров воды равном 6 об.% доходит до 3,86 %, при этом погрешность возрастает с увеличением температуры элементов датчика. При температуре элементов 210 °С и градуировке анализатора при средней влажности среды (3 об.%) погрешность измерения термокондуктометрического анализатора метана в начале диапазона от возможного изменения влажности анализируемой среды достигает 1,28 об.%, что сопоставимо с недопустимой концентрацией метана в горных выработках.

Приведенная погрешность измерения метана при изменении содержания CO₂ в анализируемой смеси составляет от 1,14 до 3,37% и уменьшается с увеличением температуры элементов датчика. При температуре элементов 210 °С и градуировке анализатора при нормальных условиях (0,03 об.% CO₂) погрешность измерения термокондуктометрического анализатора метана в начале диапазона при увеличении содержания CO₂ в анализируемой среде до 2 об.% достигает 2,19 об.%. При работе газоанализаторов метана в нормальных условиях в случае выполнения требований Правил безопасности [26] к содержанию CO₂ в рудничной атмосфере погрешность измерения концентрации метана, вызванная наличием CO₂, может доходить до 0,5 об.%. При пожарах и аварийных загазованиях, когда концентрация CO₂ может достигать десятков процентов [45,46], влияние этого газа на результаты измерения концентрации

метана термокондуктометрическим способом может быть весьма значительным, что способно привести к неоднозначности показаний.

Чувствительные элементы термокондуктометрических датчиков в ранних моделях газоанализаторов чаще всего выполняли из платиновой микропроволоки в виде нити или в виде остеклованных спиралей в форме стержня [38,47]. В последнее время предпочтение отдают элементам в виде миниатюрного шарика (спирали из платиновой микропроволоки заключенной в диэлектрик), расположенного в центре измерительной камеры сферической или близкой к ней формы. Термоэлементы являются одновременно термометрами сопротивления и нагревателями. В стационарном режиме мощность, выделяемая в элементе при прохождении через него электрического тока $P_{эл}$, отводится в окружающую среду через газовое пространство внутри камеры и элементы конструкции [47]

$$P_{эл} = P_m + P_k + P_u + P_{тк}, \quad (1.11)$$

где $P_m, P_k, P_u, P_{тк}$ - мощность, соответственно, отводимая за счет теплопроводности газовой среды, естественной конвекции, излучения, и через токоподводящие концы, Вт.

При конструировании датчиков теплопроводности стремятся к тому, чтобы конвективная составляющая теплообмена была как можно меньше, так как при наличии конвективного теплообмена на результаты измерения оказывает существенное влияние атмосферное давление. При температуре элемента 200°C и применении элемента шарообразной формы это обеспечивается при толщине газовой прослойки 5 мм и менее [47]. Теплоперенос за счет излучения и через токоподводящие концы, в этом случае в сумме составляет 30-35% от общей мощности выделяемой в термоэлементе.

Передача тепла от чувствительного элемента за счет излучения и через токоподводящие концы несколько снижает чувствительность термокондуктометрических датчиков. Кроме того, изменение в процессе эксплуатации отражательной способности излучающих поверхностей (термоэлемента и внутренних стенок камеры) за счет осаждения аэрозолей, сорбционных процессов, химического взаимодействия поверхностей и среды способно привести к перераспределению тепловых потоков в рабочей камере и возникновению дополнительных погрешностей измерения.

Теплопроводность газов практически не зависит от изменения атмосферного давления и возрастает с повышением температуры [30]

$$\lambda = \lambda_0 (T / T_0)^n, \quad (1.12)$$

где T – температура газа, К;

T_0 - температура, равная 273 К;

λ_0 - коэффициент теплопроводности газа при температуре 273 К, Вт/м К;

n - температурный коэффициент изменения теплопроводности (для воздуха $n = 0,82$, для метана $n = 1,33$).

При изменении температуры среды или температурного режима термоэлементов, из-за различного значения температурного коэффициента для воздуха и метана, возможно возникновение существенных дополнительных по-

грешностей измерения, причем величина их возрастает при измерении высоких концентраций метана [29].

Следует также отметить, что в отличие от термокаталитических датчиков, установленный в герметичной камере сравнительный терморезистор термокондуктометрического датчика способен в определенной мере компенсировать изменения только отдельных параметров атмосферы и источника питания (например, изменения температуры, напряжения питания или тока через термоэлементы). Все остальные факторы не компенсируются и оказывают в таком случае влияние на работу термокондуктометрических датчиков. При современном уровне развития микроэлектроники и микропроцессорной техники вопросы стабилизации параметров источника питания и компенсации влияния температуры среды достаточно эффективно решаются без применения компенсационных элементов. Учитывая это, представляют интерес термокондуктометрические датчики с неизолированным сравнительным термоэлементом, отличающимся от рабочего своими электротепловыми параметрами [48,49].

Проведенный анализ термокаталитического способа показывает, что этот способ характеризуется относительно большой погрешностью измерения концентрации метана, которая при контроле дозврывоопасных концентраций может превышать пороги срабатывания устройств защиты и не может быть использован как базовый при разработке средств контроля взрывоопасности атмосферы в горных выработках шахт. В то же время термокондуктометрические датчики являются работоспособным и позволяет получить однозначные результаты при высоких концентрациях метана, в том числе и при аварийных загазованиях горных выработок шахт. При контроле дозврывных концентраций метана наиболее предпочтительно применение термокаталитического способа.

Учитывая достоинства и недостатки термокаталитического и термокондуктометрического способа, начиная с 80-х годов прошлого столетия предпринимались попытки создания универсальных широкодиапазонных метанометров в которых использовались оба рассмотренных способа контроля. Примером таких решений может служить предложенный детектор метана [50], который имеет две мостовых схемы для измерения соответственно низких и высоких концентраций метана. Первая схема включает каталитически активный и компенсационный элементы, которые контактируют с контролируемым газом. Компенсационный элемент первого моста есть частью второй мостовой схемы, в которой он выполняет функции чувствительного элемента. Вторая мостовая схема содержит также герметизированный элемент, который в этом мосте является компенсационным. Детектор содержит также средства для коммутации напряжения питания обоих мостовых схем в зависимости от концентрации контролируемого газа. Подобные широкодиапазонные датчики метана нашли применение в современных средствах контроля метана. К примеру, Центр электрификации и автоматизации горнодобывающей промышленности ЕМАГ (Польша) изготавливает метанометры ММ-2 и ММ-2Р с двухдиапазонными датчиками метана, которые обеспечивают однозначность измерений в диапазоне от 0 до 100% метана [39].

В указанном детекторе горючего газа при повышении содержимого горючего газа выше указанного уровня первый мост, который содержит термокаталитический элемент, отключается и включается второй мост, который работает на кондуктометрическом принципе. При этом компенсационный элемент второй мостовой схемы, отключенный и холодный в начальном состоянии, начинает разогреваться, и измерение вторым мостом возможно только после окончания переходного процесса, связанного с разогревом компенсационного элемента. В это время измерения содержимого метана не происходит, что снижает надежность газовой защиты.

Указанные недостатки частично были устранены в устройстве для контроля содержания горючего газа в шахтной атмосфере [51], которое содержит два измерительных моста, один из которых с термокаталитическим датчиком служит для измерения низких концентраций метана, а второй с термокондуктометрическим датчиком – высоких. В диапазоне от 0 до 5 об.% электронная схема обеспечивает обработку информации от датчика контроля содержимого низких концентраций метана, а в диапазоне от 5 до 100 об.% - от датчика высоких концентраций.

В отличие от предыдущего устройства датчики низкой и высокой концентрации метана постоянно включены и в системе отсутствуют переходные процессы, связанные с их разогревом, что повышает надежность системы аэрогазовой защиты. Однако, такое устройство довольно сложное и имеет сравнительно большое энергопотребление. Кроме того, термокаталитический датчик остается включенным при аварийных загазованиях, что может привести к изменению его характеристик или выходу из строя в результате газовых перегрузок при высоких концентрациях метана.

В широкодиапазонном анализаторе горючих газов [52] используется только одна мостовая схема с термокаталитическим датчиком метана. При этом в диапазоне концентраций метана от 0 до 5 об.% электронная схема обеспечивает обработку информации как в обычном термокаталитическом анализаторе, а в диапазоне от 5 до 100 об.% электронная схема осуществляет контроль напряжения на сравнительном элементе, величина которого зависит от содержания метана. В данном случае датчик высоких концентраций является одноэлементным, а чувствительным элементом датчика является сравнительный термоэлемент термокаталитического датчика. Анализатор имеет меньшее энергопотребление, однако термокаталитический датчик остается включенным при аварийных загазованиях, что может привести к его повреждению. Сравнительный элемент имеет температуру предварительного разогрева более 360 °С, что обеспечивает достаточно высокую чувствительность к метану в области высоких концентраций. Однако при такой температуре на сравнительном элементе происходит активное окисление водорода, СО и высших гомологов метана, что приводит к повышению его температуры, активизации по отношению к метану и возникновению больших погрешностей измерения.

Среди иных способов контроля содержания метана, которые могут быть использованы при разработке газоанализаторов, следует также выделить электрохимический и ультразвуковой. Первый из них по селективности измерения

компонентов и надежности работы в шахтных условиях существенно уступает термokatалитическому и не нашел применения в практике контроля взрывоопасности. Ультразвуковой способ основан на различии в скорости распространения звука в воздухе и метане. Его достоинством является малая инерционность, что позволяет создавать на его основе малоинерционные средства контроля [32] для систем быстродействующей газовой защиты. Однако для этого способа характерны такие недостатки как зависимость результатов измерения от температуры, давления и наличия влияющих газовых примесей, что приводит к значительной погрешности измерения при контроле до взрывных концентраций метана.

Все существующие средства и системы контроля взрывоопасности горных выработок шахт принято делить на следующие группы [26,53]:

- переносные приборы эпизодического действия;
- переносные автоматические приборы;
- стационарные автоматические приборы;
- системы автоматического дистанционного контроля.

Область применения той или иной группы устанавливается согласно [26] в зависимости от категории шахты по метану. Существующие отечественные и зарубежные средства контроля метана достаточно хорошо описаны в литературе [29,30]. Наиболее известными производителями автоматических переносных и стационарных приборов для измерения метана среди зарубежных фирм являются “Рикен Кейки файн инструмент” (Япония), “Dreger” и GfG (Германия), “Industrial scientific corporation” и “Бахарак” (США), “Олдам” (Франция) и другие. Следует отметить, что практически все разработанные ими для условий горных предприятий приборы основаны на использовании термokatалитического способа контроля или сочетании термokatалитического и термокондуктометрического способов.

Модели переносных и стационарных термokatалитических газоанализаторов фирм “Рикен Кейки файн инструмент”, “Dreger”, GfG и др. отличаются друг от друга внешним видом, массой и габаритами, параметрами источников питания, видами предупредительных сигналов, погрешностью измерения, конструктивным исполнением и расположением индикаторов, однако всем им присущ ряд недостатков, обусловленных недостатками используемого термokatалитического способа контроля. К ним относится низкая устойчивость датчиков к перегрузкам по метану, что приводит к нарушению работоспособности анализаторов при аварийных загазованиях, кроме того они не обеспечивают однозначности измерения и сигнализации при изменении концентрации метана в диапазоне 0 – 100 об.%, в соответствии с требованиями ГОСТ [54].

Первыми отечественными автоматическими стационарными средствами контроля метана основанными на термокондуктометрическом способе были газоанализаторы КАМ-1, предназначенные для непрерывного измерения концентрации метана в газовых смесях, отсасываемых дегазационными установками, а также анализаторы для автоматического контроля содержания водорода в батарейных ящиках взрывобезопасных аккумуляторных электровозов [38]. Анализаторы имели сложную конструкцию и отличались нестабильностью работы.

В последующем предпринимались неоднократные попытки совершенствования термокондуктометрических газоанализаторов, создания и освоения производства средств контроля дегазационных систем [55,56].

В настоящее время ОАО «Красный металлист» освоен выпуск аппаратуры АКРД с термокондуктометрическим датчиком метана ДМД, предназначенной для контроля дегазационных систем. Приведенная основная погрешность измерения этого анализатора составляет 4%, что не позволяет использовать такие анализаторы для контроля взрывоопасности среды в горных выработках шахт. Разнообразные модели термокондуктометрических газоанализаторов выпускаются также рядом зарубежных фирм. Примером таких газоанализаторов может служить микропроцессорный метанометр ММ-2А [39], который содержит выносной термокондуктометрический датчик, соединенный с измерительным блоком кабелем длиной до 5 м и обеспечивает контроль содержания метана в диапазоне 0 – 100 об.%.

В современных моделях термокондуктометрических газоанализаторов для контроля дегазационных систем не удалось устранить влияние на результаты измерения изменения влажности и газового состава контролируемой среды, что обуславливает нестабильность «нуля» анализаторов, относительно большую погрешность измерения, необходимость регулирования и настройки в месте установки, регулярного обслуживания и надзора за работой таких газоанализаторов.

Стационарные средства автоматического контроля метана с самого начала их разработки объединялись в локальные системы автоматической газовой защиты и централизованного телеавтоматического контроля метана [57-67]. Первой отечественной системой являлся комплект аппаратуры АМТ-3И, в состав которой входила диспетчерская стойка СПТ-3И и комплекты аппаратуры АМТ-3Т и АМТ-3У [57]. Система осуществляла прием, отображение, регистрация на бумажных носителях информации о содержании метана в местах установки датчиков и сигнализация о недопустимой концентрации метана.

Последующие разработки обычно включали средства контроля разнообразных параметров безопасности и системы обработки данных с использованием ЭВМ. Так, например, система «MINOS» состояла из набора измерительных станций, обеспечивающих контроль содержания метана, скорости движения воздуха и задымленности атмосферы, которые соединялись общим каналом телеметрии с поверхностным комплексом, где происходила обработка данных с помощью ЭВМ, осуществлялось хранение и отображение информации [60].

Как в первых, так и в последующих отечественных и зарубежных системах вопросы, связанные с обеспечением работоспособности средств контроля метана или защитой термокаталитических датчиков от газовых перегрузок при аварийных загазировании горных выработок шахт не решались, а отдельные попытки осуществить автоматическую диагностику работоспособности термокаталитического датчика после аварийных перегрузок [64] по ряду причин оказались неудачными.

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области создания средств контроля содержания метана и компьютеризированных систем контро-

ля безопасности горных предприятий, вопросы, связанные с обеспечением работоспособности газоанализаторов при аварийных загазованиях горных выработок шахт, до настоящего времени не нашли своего окончательного решения.

Выводы

Выполненный анализ причин и особенностей формирования взрывоопасных смесей при аварийных загазованиях горных выработок шахт, существующих способов и средств контроля взрывоопасности газовых смесей позволяет сделать следующие выводы:

- несмотря на сравнительно небольшую частоту взрывов метановоздушных смесей и пыли, последствия и ущерб, вызываемый этими явлениями, являются весьма значительными и сопоставимыми с последствиями от таких наиболее распространенных видов аварий как пожары;

- значительно чаще, чем взрывы, на угольных шахтах возникают аварийные ситуации, связанные с загазованием горных выработок шахт, которые, при наличии источников воспламенения образовавшейся метановоздушной смеси, могут перерасти в аварии с тяжелыми последствиями;

- загазование подготовительных выработок чаще всего возникает из-за нарушений проветривания и внезапного выделения метана в выработки, вызванное газодинамическими явлениями;

- при нарушении проветривания максимальная концентрация метана в тупиковой выработке может достигать десятков процентов, а время загазования до максимальной концентрации составляет десятки минут;

- загазование подготовительных выработок, вызванное внезапным выделением метана в результате газодинамических явлений, протекает значительно быстрее, а максимальная концентрация метана в части выработки прилегающей к груди забоя за считанные секунды может достигать 100 об.%;

- аварийные загазования очистных выработок и выработок исходящих из очистных забоев и панелей шахт связаны с нарушениями проветривания из-за увеличения сопротивления воздушной струе (завалы, возведение перемычек и др.), образованием застойных зон и местных скоплений в них метана, накоплением метана в выработанных пространствах, а также с внезапными выделениями метана в результате газодинамических явлений;

- основной причиной, обуславливающей то, что загазование выработок шахт до взрывоопасной концентрации приводит к взрывам, является несрабатывание автоматической газовой защиты или сигнализации о наличии недопустимой концентрации метана;

- отказ средств автоматического газового контроля или несрабатывание сигнализации о наличии недопустимой концентрации метана, прежде всего, обуславливаются недостаточной надежностью аппаратуры АГК или сигнализаторов, изменением чувствительности термокаталитических средств контроля в процессе эксплуатации, несанкционированным вмешательством в работу

средств защиты, неоднозначностью срабатывания средств контроля метана и отсутствием средств контроля во всех потенциально опасных местах;

- кроме метана в рудничном газе присутствуют другие взрывоопасные газы, причем большое содержание примесей в рудничном газе наблюдается при разработке угольных пластов ранней и средней стадий метаморфизма, где концентрация высших гомологов метана в смеси газов достигает до 5 %, а кроме того в небольших количествах присутствует водород (до 0,25 %);

- пожарные газы, распространяющиеся по горным выработкам, могут существенно изменить состав атмосферы в месте установки газоанализаторов, при этом содержание оксида углерода и водорода в рудничном воздухе при пожарах достигает 2,0 об.% и более, существенно влияет на взрывчатые свойства газовой смеси;

- существующие термокatalитические газоанализаторы, обеспечивающие надежный контроль взрывоопасности газовой смеси при довзрывных концентрациях метана, при аварийных загазированиях оказываются неработоспособными, а после длительной работы датчиков в газовой среде с концентрацией метана более 10 об.% существенно меняются их характеристики, что требует или защиты датчиков от газовых перегрузок или проверки стабильности их работы в нормальных условиях эксплуатации;

- термокондуктометрические газоанализаторы, которые используются для контроля дегазационных систем, имеют большую погрешность измерения, обусловленную влиянием изменения влажности и газового состава контролируемой среды, характеризуются нестабильностью «нуля» анализаторов и не могут быть использованы для контроля взрывоопасности газовой смеси при довзрывных концентрациях метана;

- существующим моделям широкодиапазонных анализаторов метана, в которых одновременно используется термокatalитический и термокондуктометрический способы измерения, присущ ряд недостатков, заключающихся в наличии длительных переходных процессов при переходе на другой способ измерения, сложности датчиков, возможности окисления высших гомологов метана и водорода на чувствительных элементах и отсутствии защиты кatalитически активного элемента термокatalитического датчика от газовых перегрузок.

Для повышения эффективности и достоверности контроля взрывоопасности горных выработок угольных шахт необходимо обосновать способы измерения концентрации метана и разработать средства контроля обеспечивающие работоспособность газоанализаторов при аварийных загазированиях горных выработок шахт, в том числе:

- исследовать работоспособность анализаторов метана в многокомпонентных газовых смесях;

- изучить, как изменяются параметры термокatalитических датчиков метана в процессе их длительной работы в шахтных условиях;

- установить причины отказов и нестабильной работы существующих термокондуктометрических датчиков метана при аварийных загазированиях шахт;

- обосновать новые, более совершенные способы контроля, обеспечивающие контроль взрывоопасности газовых смесей при аварийных загазованиях шахт;

- разработать средства контроля взрывоопасности многокомпонентных газовых смесей, обеспечивающих работоспособность систем газовой защиты при аварийных загазованиях шахт, повышающих надежность и достоверность контроля.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОЗНАЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ

2.1. Особенности работы термокаталитических датчиков при высоких концентрациях метана

Учитывая то, что неоднозначность определения метана может привести к ошибочному включению машин и механизмов при наличии взрывоопасной концентрации метана, ГОСТ 24032-80 [54] была заложена норма по однозначности срабатывания газовой защиты. До настоящего времени причины неоднозначности работы средств контроля метана не были в достаточной мере изучены, что в определенной мере обуславливало отсутствия технических решений позволяющих выполнить требования ГОСТ.

В угольной промышленности Украины, стран СНГ и Чехии в течение длительного времени эксплуатируются переносные и стационарные анализаторы метана производства ОАО «Красный металлист» (Украина) и Омского завода «Электроточприбор» (Россия). В качестве чувствительного элемента к метану в этих приборах применяются термокаталитические датчики, содержащие рабочий (каталитически активный) и сравнительный чувствительные элементы, описанные в предыдущем разделе. В серийно выпускаемых анализаторах и сигнализаторах метана датчик, как правило, включается в мостовую измерительную схему. На практике применяют мостовые измерительные схемы с последовательным расположением рабочего и сравнительного элемента (рис. 2.1) и измерительные схемы с включением элементов в разные плечи моста (рис. 2.2). Учитывая требования по обеспечению искробезопасных параметров источников питания, с целью снижения мощности, потребляемой мостовой измерительной схемой, в шахтных приборах наиболее часто применяют первую схему включения [30].

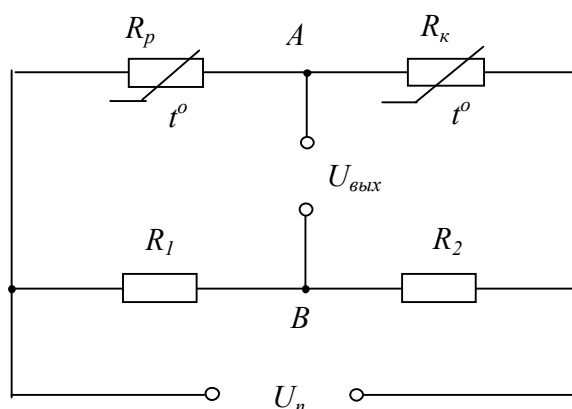


Рис. 2.1. Схема включения термокаталитического датчика с последовательным расположением элементов

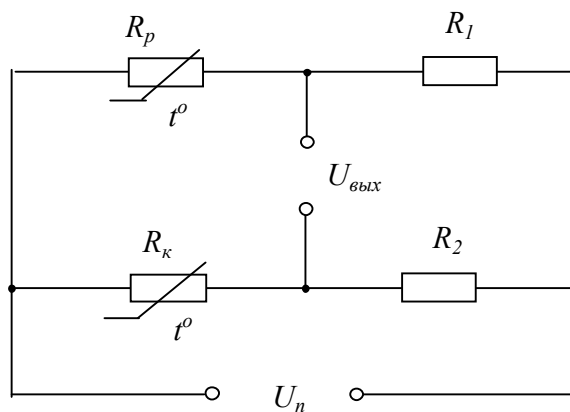
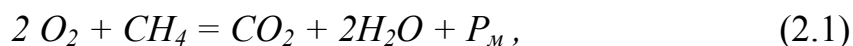


Рис. 2.2. Схема включения термокаталитического датчика с расположением элементов в различных плечах моста

Окисление в метановоздушной смеси на рабочем элементе датчика протекает по известной реакции:



где P_m – количество тепла, выделяющееся при сгорании моля метана, Дж.

При небольшой концентрации метана и протекании реакции окисления на рабочем элементе в диффузионной области поток метана Q_m к его поверхности линейно зависит от концентрации метана в реакционной камере и эффективной диффузионной проводимости элемента [30]

$$Q_m = \gamma_{\varepsilon} C_{mk}, \quad (2.2)$$

где $\gamma_{\varepsilon} = 10^{-2} K_{\varepsilon f} \beta_m F_{\varepsilon}$ – эффективная диффузионная проводимость элемента, м³/с;

C_{mk} – концентрация метана в реакционной камере;

$K_{\varepsilon f}$ – коэффициент эффективности окисления метана;

β_m – коэффициент массопередачи, м/с;

F_{ε} – площадь поверхности элемента, м².

В таком случае количество тепла, выделяющегося на рабочем элементе, будет пропорционально концентрации метана в реакционной камере и низшей теплоте сгорания метана

$$P_m = Q_{mn} \gamma_{\varepsilon} C_{mk} \quad (2.3)$$

где Q_{mn} – низшая теплота сгорания метана, Дж/м³.

Температура рабочего элемента определяется суммарной мощностью выделяемой на элементе от источника электроэнергии $P_{эл}$ и окисления метана и может быть определена исходя из выражения [30]

$$P_{эл} + P_m = K(t_{p_2} - t_2), \quad (2.4)$$

где K – тепловая проводимость элемента, Вт/°С;

$t_{pэ}$ - температура рабочего элемента, °С;

t_2 - температура газа, °С;

Температура сравнительного элемента определяется мощностью выделяемой на элементе от источника электроэнергии $P_{эл}$

$$P_{эл} = K(t_{сэ} - t_2) \quad (2.5)$$

где $t_{сэ}$ - температура сравнительного элемента, °С;

Тогда, при равенстве тепловой проводимости элементов, с учетом выражений 2.3 – 2.5 разница температур рабочего и сравнительного элементов, определяющая выходной сигнал мостовой измерительной схемы будет равна

$$\Delta t = t_{pэ} - t_{сэ} = \frac{Q_{мн} \gamma_{э} C_{мк}}{K}. \quad (2.6)$$

Зависимость величины сопротивления платинового термоэлемента $R_э$ от температуры, в диапазоне температур характерных для работы термокаталитического датчика обычно представляют в виде [30]

$$R_э = R_{э0}(1 + \beta_э t_э), \quad (2.7)$$

где $R_{э0}$ - сопротивление элемента при 0 °С;

$\beta_э$ - температурный коэффициент сопротивления элемента, 1/°С.

В таком случае, при равенстве начального сопротивления элементов выходное напряжение термогруппы при дозрывных концентрациях метана будет линейно зависеть от концентрации метана

$$U_{вых} = \frac{R_{э0} I_{э} \beta_{э} Q_{мн} \gamma_{э} C_{мк}}{2K}, \quad (2.8)$$

где $I_{э}$ - величина тока, протекающего через элементы, А.

При больших концентрациях метана, для случая, когда лимитирующим компонентом становится кислород воздуха, а реакция окисления на рабочем элементе протекает в диффузионной области, количество тепла, выделяющегося на рабочем элементе, будет пропорционально потоку кислорода Q_k к поверхности этого элемента

$$Q_k = \gamma_{э} C_{кк}, \quad (2.9)$$

где $C_{кк}$ – концентрация кислорода в реакционной камере.

Концентрация кислорода в рудничной атмосфере связана с концентрацией метана следующей формулой [6]

$$C_k = 0,21(1 - C_m). \quad (2.10)$$

В реакционной камере кроме азота, кислорода и метана присутствуют также продукты реакции окисления метана, что в некоторой мере влияет на соотношение их концентраций, однако, для условий, когда диффузионная проводимость реакционной камеры существенно больше эффективной диффузион-

ной проводимости элемента этим влиянием можно пренебречь. При неизменной эффективной диффузионной проводимости элемента, с учетом того, что на окисление одной молекулы метана требуется две молекулы кислорода, для больших концентраций метана зависимость выходного сигнала от его содержания будет иметь вид

$$U_{\text{вых}} = 0,0525 \frac{R_{\text{э0}} I_{\text{э}} \beta_{\text{э}} Q_{\text{мн}} \gamma_{\text{э}}}{K} (1 - C_{\text{мк}}). \quad (2.11)$$

Таким образом, при избытке кислорода выходной сигнал термогруппы, возникающий в результате окисления метана на рабочем элементе, описывается уравнением 2.8 (вплоть до 9,5об.% метана), а при избытке метана - уравнением 2.11. Исходя из уравнений выходной сигнал мостовой измерительной схемы сначала растет с увеличением содержания метана до 9,5об.%, а затем уменьшается. На рис. 2.3 приведена теоретическая зависимость выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ мостовой измерительной схемы с термокаталитическим датчиком (кривая 1) от концентрации метана в диапазоне от 0 до 100об.%

Если на графике зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ провести прямую (кривая 2) параллельно оси X через относительное значение выходного сигнала, соответствующее содержанию метана, при котором происходит отключение оборудования защищаемого участка при наличии средств АГК ($C=1,3\text{об.}\%$), то можно определить верхнюю теоретическую границу диапазона содержания метана, при которой еще должно срабатывать пороговое устройство газоанализатора с термокаталитическим датчиком. На кривой 1 (рис. 2.3) верхняя граница диапазона содержания метана, при котором однозначно должна срабатывать газовая защита при нормированном значении $C = 1,3\text{об.}\%$, составляет 90об.% Такая норма по однозначности срабатывания газовой защиты заложена в ГОСТ [54], в соответствии с требованиями которого испытания метанометров на однозначность показаний или срабатывания отключающего устройства осуществляются подачей на датчик метановоздушной смеси с объемной долей метана 90об.%

При указанном методе испытаний [54], однозначность срабатывания защиты при использовании термокаталитических средств контроля обеспечивается если зависимость выходного напряжения от содержания метана $U_{\text{вых}}=f(C)$ для реальных газоанализаторов соответствует теоретической кривой 1 (рис. 2.3) или расположена выше указанной кривой в области высоких концентраций метана. Однако экспериментальными исследованиями справедливость этого предположения в достаточной мере не подтверждена. Более того, известные данные [37] о зависимости выходного напряжения термокаталитических датчиков от концентрации метана $U_{\text{вых}}=f(C)$, показывают, что в области высоких концентраций метана реальная зависимость расположена ниже теоретической кривой (см. рис. 2.4).

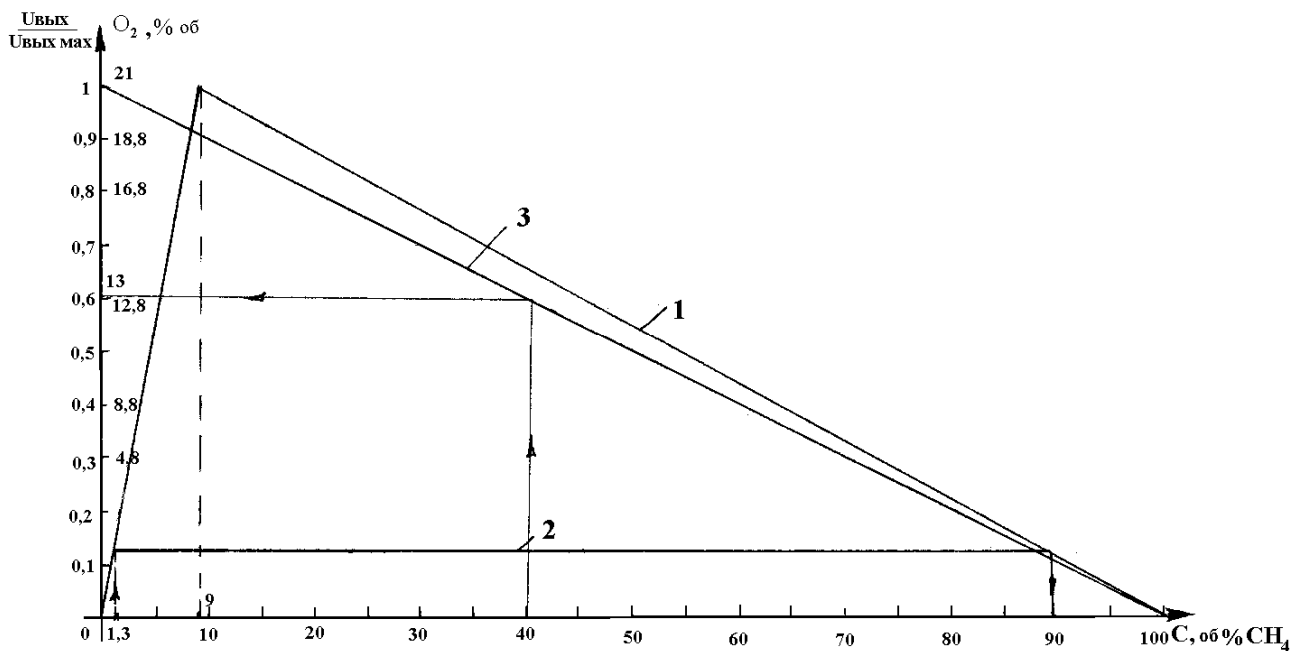


Рис. 2.3. Теоретическая зависимость выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ мостовой измерительной схемы от концентрации метана:

1- зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$; 2 – уровень выходного сигнала, при котором происходит срабатывание защиты; 3- изменение концентрации кислорода в рудничной атмосфере при накоплении метана.

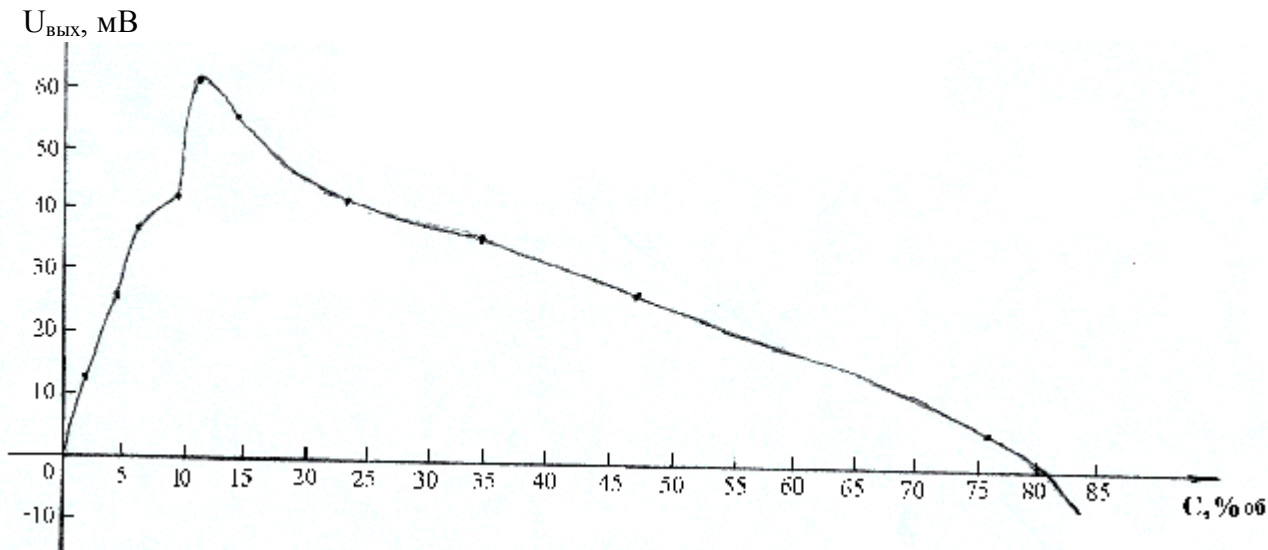


Рис. 2.4. Зависимость выходного сигнала мостовой измерительной схемы от концентрации метана по данным фирмы “Рикен Кейки”

Из рис. 2.4 видно, что при использовании термокаталитических датчиков фирмы “Рикен Кейки” однозначность срабатывания защиты при высоких концентрациях метана обеспечивается только до 80 об.%, а в дальнейшем наблюдается снижение до нуля и последующая инверсия выходного сигнала термогруппы. Очевидно, что при таком характере кривой однозначность срабаты-

ния защиты не обеспечивается [54]. Причины инверсии выходного сигнала термогруппы и отклонения реальной зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ от теоретической кривой в работе [37] не объяснены.

Проверка переносных и стационарных сигнализаторов и анализаторов метана, выпускаемых ОАО “Красный металлист”, на соответствие требованиям ГОСТа [54] по однозначности показаний и срабатывания сигнализации также показала, что выпускаемые технические средства не всегда обеспечивают однозначности срабатывания защиты [54] в области высоких концентраций метана. Это обуславливает необходимость доработки выпускаемых переносных и стационарных сигнализаторов и анализаторов метана до требований ГОСТа [54] по однозначности показаний и срабатывания сигнализации. Для чего требуется проведение исследований особенностей работы применяемых термокаталитических датчиков в диапазоне изменения содержания метана от 0 до 100% и установления их реальных характеристик $U_{\text{вых}}=f(C)$.

2.2. Методика экспериментальных исследований однозначности определения содержания метана термокаталитическими датчиками

Экспериментальные исследования однозначности определения содержания метана термокаталитическими датчиками осуществлялось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 2.5.

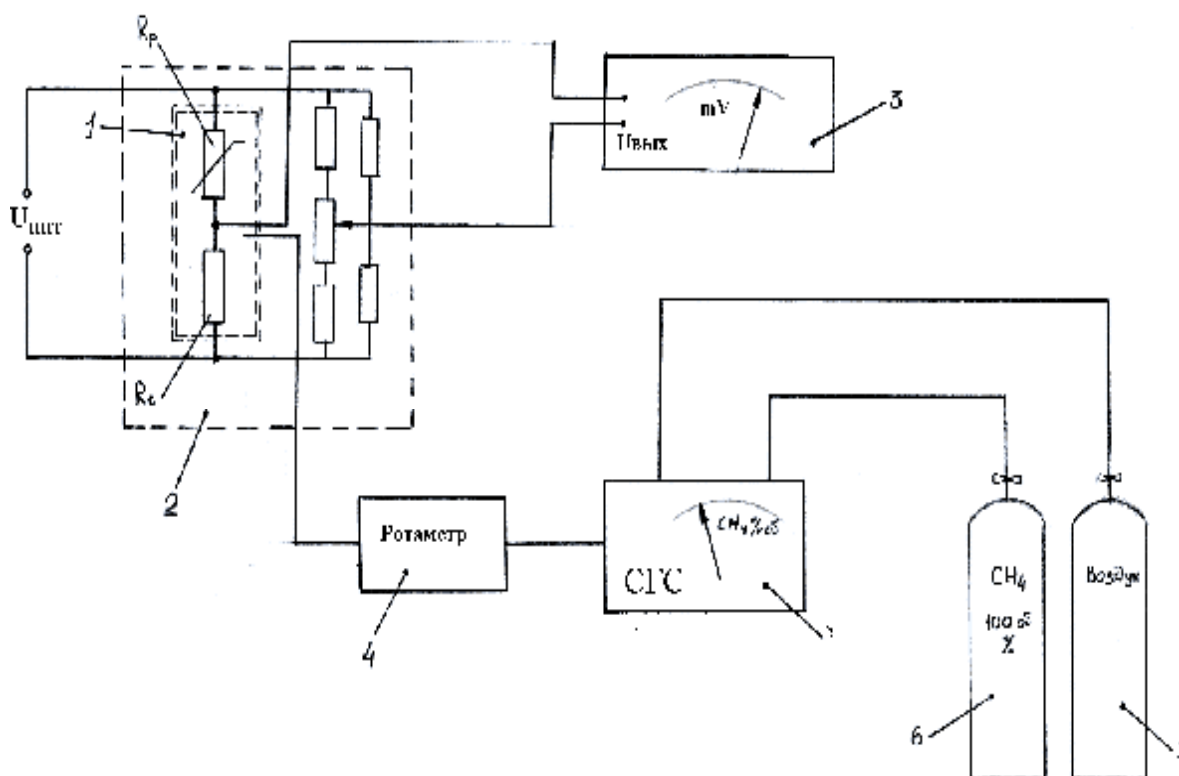


Рис. 2.5. Экспериментальная установка для проведения исследований: 1 – испытуемая термогруппа; 2 – мостовая измерительная схема; 3- электронный вольтметр; 4 – ротаметр; 5 – синтезатор газовых смесей; 6,7 – баллоны с метаном и воздухом.

Установка включает электронный вольтметр, универсальный источник питания, баллоны с метаном и воздухом, синтезатор газовых смесей и позволяет осуществлять подачу газовой смеси к испытуемой термогруппе в диапазоне концентраций от 0 до 100 об.% метана с погрешностью $\pm 0,2$ об.%. Исследования проводились на термогруппах серийно выпускаемых ОАО “Красный металлист”, которые используются в сигнализаторах метана и стационарной аппаратуре.

Для исследований из различных партий термогрупп было отобрано 30 термогрупп используемых в стационарных анализаторах метана (диаметр платинового микропровода 30 мкм) и 30 термогрупп используемых в сигнализаторах метана (диаметр платинового микропровода 20 мкм). Программой исследований первоначально предусматривалось снятие зависимости $U_{вых}=f(C)$, в диапазоне изменения C от 0 до 100 и от 100 до 0 об.%

Исследования термогрупп производились при температуре воздуха в помещении $25\pm 2^\circ\text{C}$ в следующей последовательности:

- испытательная камера установки продувалась чистым атмосферным воздухом;

- испытуемая термогруппа устанавливалась в испытательную камеру и включалась в мостовую измерительную схему, к выходу которой подключался милливольтметр;

- на мостовую измерительную схему от блока питания подавалось стабилизированное напряжение соответствующее номинальной величине напряжения питания термогруппы в стационарных анализаторах и сигнализаторах метана;

- через 15 минут (после полного прогрева термогруппы и установления показаний) производилась балансировка мостовой измерительной схемы (устанавливалось $U_{вых}=0$);

- при помощи синтезатора газовых смесей создавалась концентрация метана 1 об.% и подавалась в испытательную камеру, причем расход подаваемой в камеру газовой смеси устанавливался таким, чтобы за время 5 мин объем газовой смеси подано в камеру на два порядка превысил объем испытательной камеры;

- через 5 мин после начала подачи газовой смеси с интервалом в 5с производилось снятие 10 показаний с милливольтметра и определялось среднее значение $\bar{U}_{вых}$ при данной концентрации метана и максимальная относительная величина отклонения единичных измерений от среднего значения;

- если максимальная относительная величина отклонения единичных измерений от среднего значения не превышала 5% то в испытательную камеру подавалась новая газовая смесь, в противном случае осуществлялась дополнительная продувка камеры в течении 5 мин и производились повторные измерения;

- в диапазоне концентраций метана от 0 до 10 об.% концентрация менялась с градацией 1 об.%, а в диапазоне от 10 до 100 об.% - 10 об.%;

- после снятия показаний при концентрации 100 об.% производилось снижение концентрации с той же градацией вплоть до нулевой концентрации метана и соответствующее снятие показаний;

- если после выполнения полного цикла измерений показания милливольтметра при возврате к нулевой концентрации метана не превышали 2% от величины максимального значения выходного сигнала при испытаниях, исследования термогруппы считались законченными, а при больших отклонениях термогруппа подвергалась дополнительному старению и испытания повторялись.

2.3. Результаты экспериментальных исследований однозначности определения содержания метана термокаталитическими датчиками

Тщательная постановка и проведение исследований с одной стороны позволила подтвердить известный факт несоответствия термокаталитических датчиков требованиям ГОСТа [54] по однозначности показаний, а с другой – выявить ряд неизвестных ранее закономерностей изменения выходного сигнала датчиков при изменении концентрации метана от 0 до 100 об.%.

Прежде всего, следует отметить, что среди исследуемых термогрупп нет пар с абсолютно идентичными характеристиками. Каждая термогруппа имеет свою зависимость $U_{вых}=f(C)$ однако форма и характер этих зависимостей повторяется. На рис. 2.6 – 2.8 приведены наиболее типовые зависимости $U_{вых}=f(C)$ для термогрупп, полученные при увеличении концентрации метана в испытательной камере от 0 до 100 об.%. Они отобраны в зависимости от направления и величины смещения выходного напряжения при концентрации метана 100 об.%.

На рис. 2.6 представлена характерная зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогрупп у которых наблюдается существенный сдвиг выходного сигнала при больших концентрациях метана в область положительных значений. Такой характер зависимости имеют до 30% исследованных термогрупп.

На рис. 2.7 - зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогрупп у которых наблюдается инверсия выходного сигнала при больших концентрациях метана (до 60% термогрупп). На рис. 2.8 - зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогрупп характеризующихся незначительным сдвигом нуля при 100 об.% метана (около 10 % термогрупп).

Несмотря на различия зависимостей при высоких концентрациях метана в области концентраций от 0 до 10 об.% зависимость $U_{вых}=f(C)$ для всех исследуемых термогрупп характеризуется:

- практически линейным ростом выходного сигнала с увеличением концентрации метана до 7 об.%;

- наличием резкого уменьшения выходного сигнала (провал выходной характеристики) в области взрывных концентраций метана, при переходе величины концентрации метана с 8 об.% до 9 об.%;

- наличием резкого роста до максимальной величины выходного сигнала при повышении концентрации метана до 9 об.%;

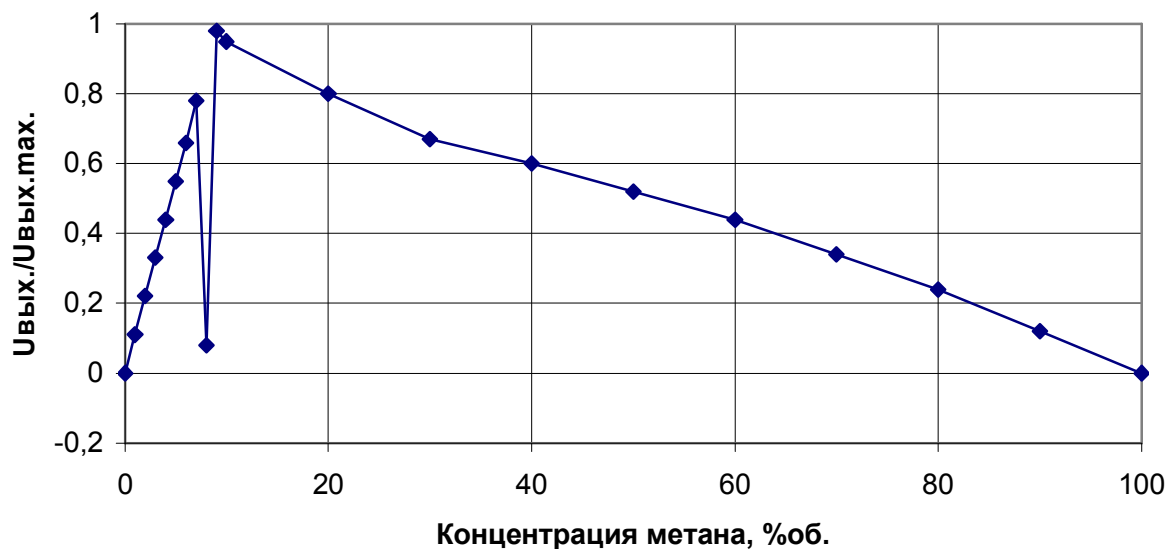


Рис. 2.8. Характерная зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$ для термогрупп с незначительным сдвигом нуля при 100 об.% метана (ТГ №36)

Наличие резкого уменьшения выходного сигнала (провал выходной характеристики) в области взрывных концентраций метана не было установлено ранее при исследовании термогрупп другими исследователями и обнаружено нами впервые. Это явление может привести к включению защищаемого электрооборудования на аварийном участке при наличии взрывоопасной концентрации метана и, как следствие, к взрыву метановоздушной смеси. Объяснить явление исходя из существующих представлений о протекании процессов гетерогенно-каталитического окисления метана на платино-палладиевых катализаторах не представляется возможным. Поэтому, учитывая особую опасность провала выходной характеристики термокаталитических датчиков в области взрывных концентраций метана, требуется проведение исследований этого явления.

Результаты анализа зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ для исследуемых термогрупп в области высоких концентраций метана (от 10 до 100 об.%) показывают, что только для 30% средств контроля метана, в которых используются термогруппы, характеризующихся существенным сдвигом выходного сигнала в область положительных значений при $C=100 \text{ об.}\%$, обеспечивается однозначность срабатывания защиты в области высоких концентраций метана при испытаниях в соответствии с ГОСТ [54]. 60% средств контроля метана, в которых используются термогруппы с инверсией выходного сигнала при $C=100 \text{ об.}\%$, однозначность срабатывания защиты при высоких концентрациях метана не обеспечивают. Для остальных 10% средств контроля метана, характеризующихся незначительным сдвигом нуля термогрупп при 100 об.% метана, однозначность срабатывания защиты будет нестабильной и зависит от условий эксплуатации и возможных временных изменений характеристик рабочего и компенсационного элементов в процессе эксплуатации.

Вид нисходящей зависимости $U_{вых}=f(C)$ в области высоких концентраций метана для основного числа исследованных термогрупп близкий к линейному. Однако у некоторых термогрупп (до 10%) в области от 60 до 80 об.% метана наблюдается существенное увеличение крутизны характеристики с последующим ее выполаживанием. Причем такие переломы наблюдаются для термогрупп как со сдвигом выходного сигнала при 100 об.% метана в область положительных значений так и с инверсией выходного сигнала. Характерный вид таких зависимостей полученный при увеличении концентрации метана в испытательной камере от 0 до 100 об.% приведен на рис. 2.9 и рис. 2.10.

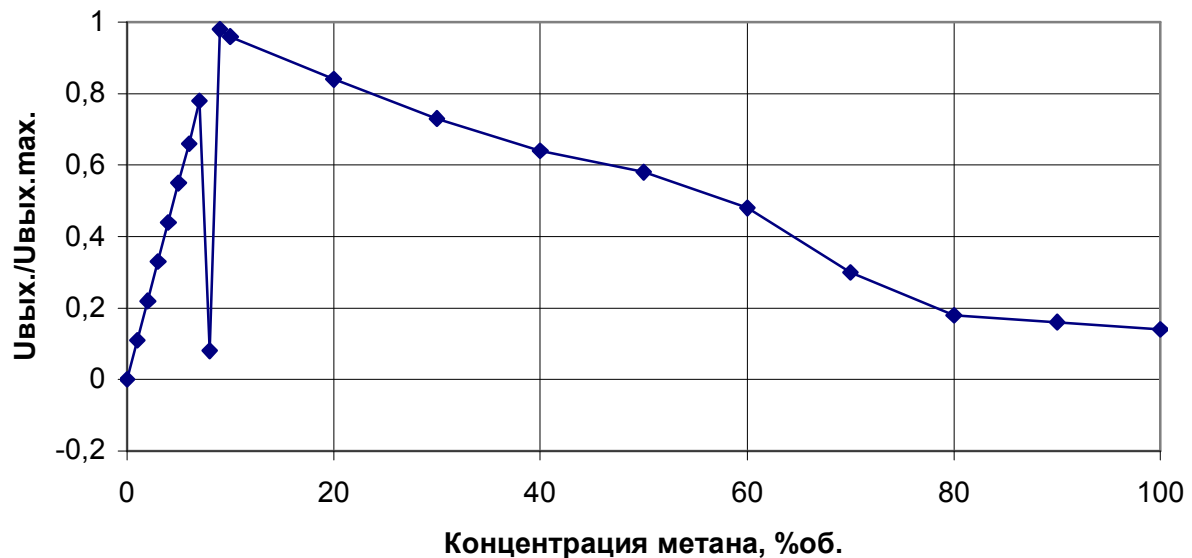


Рис. 2.9. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ с изменением крутизны характеристики в области высоких концентраций. (ТГ №23)

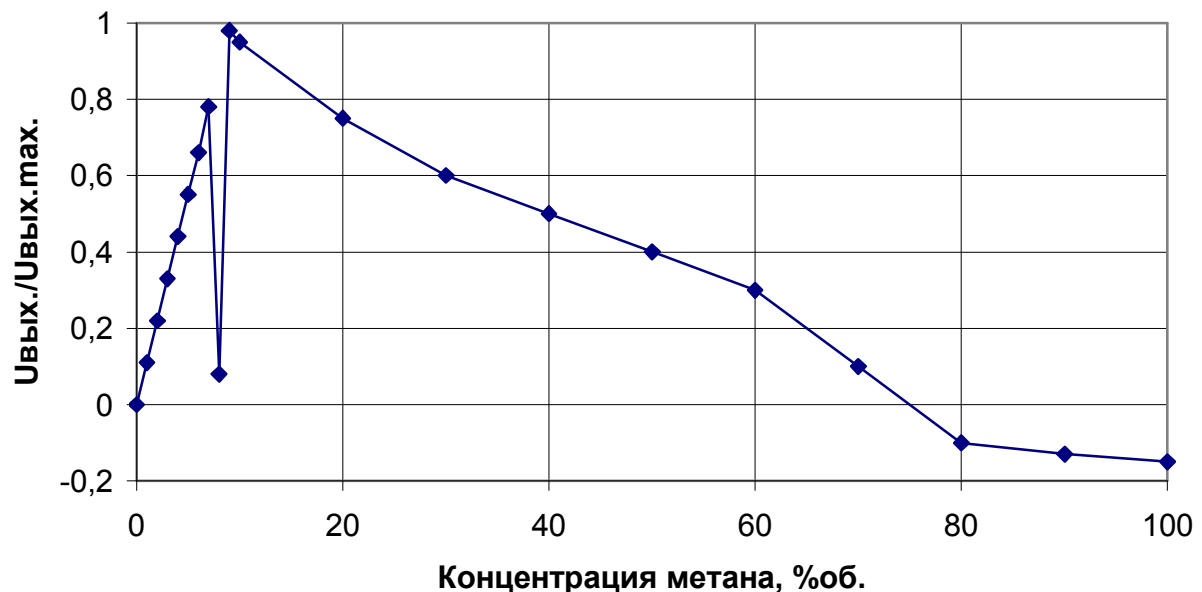


Рис. 2.10. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ с изменением крутизны характеристики в области высоких концентраций. (ТГ №47)

Зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ для термогрупп, полученные при уменьшении концентрации метана в испытательной камере от 100 до 0 об.% по форме в значительной мере повторяют зависимости полученные при увеличении концентрации метана но с некоторым смещением $U_{\text{вых}}$ в область меньших его значений. На рис. 2.11 приведена прямая и обратная характеристика для термогруппы с инверсией выходного сигнала (ТГ №3). Для таких термогрупп смещение $U_{\text{вых}}$ в область меньших его значений несколько расширяет зону неоднозначной работы средств защиты при обратном ходе концентрации.

Для части термогрупп, прежде всего для тех которые характеризуются изменением крутизны характеристики в области высоких концентраций, указанные смещения являются весьма значительными, что приводит к появлению значительного гистерезиса показаний. На рис. 2.12 и 2.13 приведены зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$ при нарастании и снижении концентрации метана для термогрупп №47 и №23. Для первой из них характерна инверсия выходного сигнала при высоких концентрациях метана, а для второй – сдвиг характеристики в область положительных значений выходного сигнала.

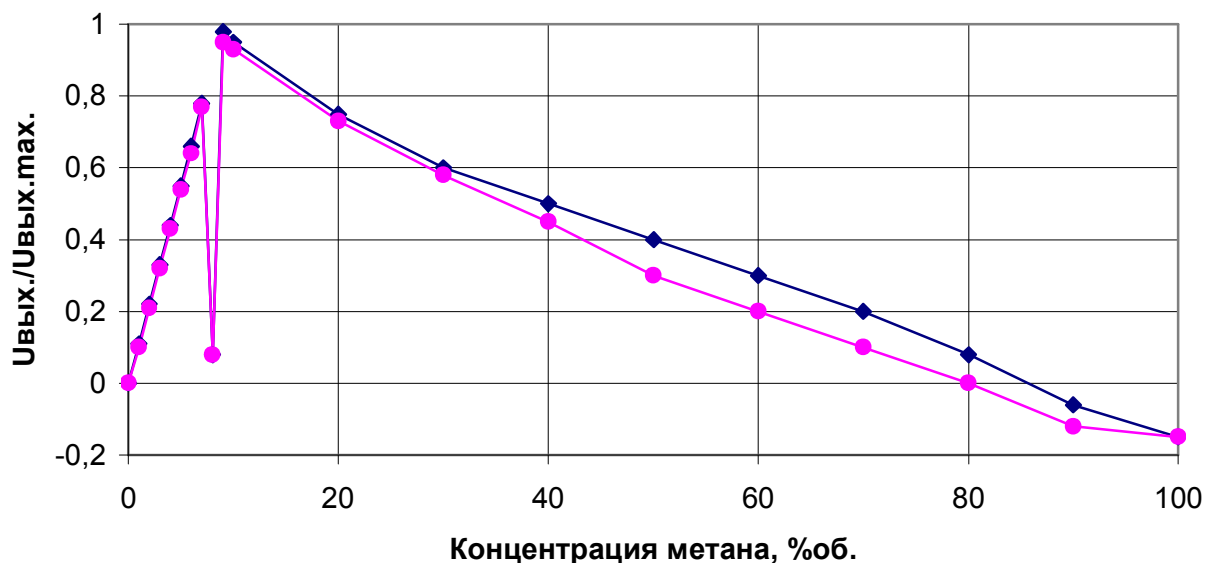


Рис. 2.11. Зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$ для термогруппы с инверсией выходного сигнала при 100 об.% метана (ТГ №3): \blacklozenge - изменение концентрации метана от 0 до 100 об.%; \bullet - изменение концентрации метана от 100 до 0 об.%

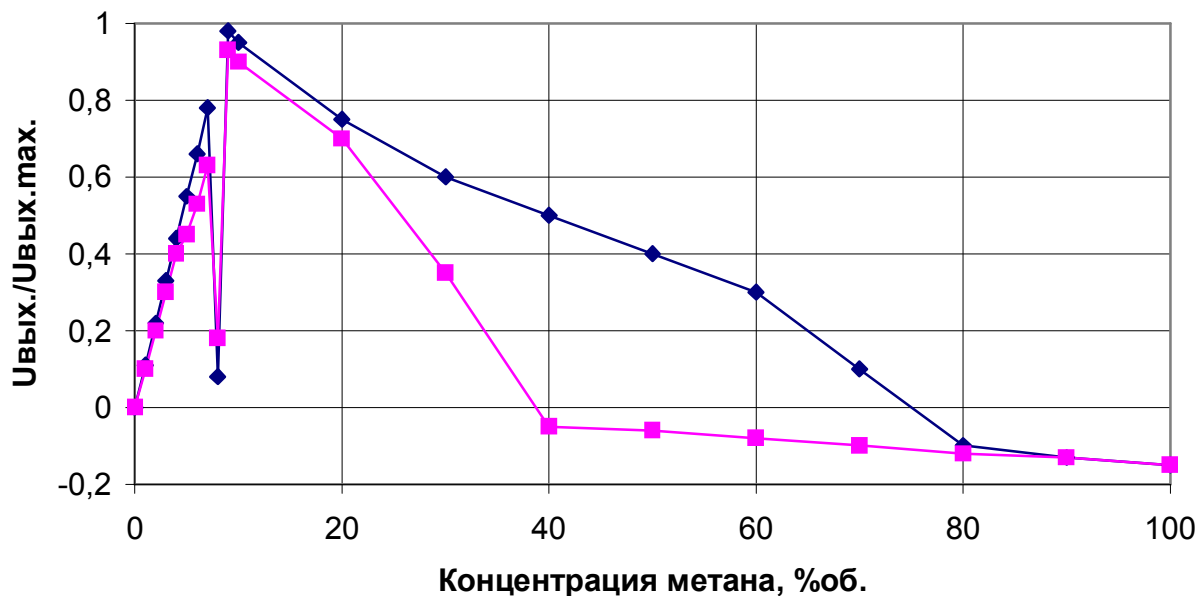


Рис. 2.12. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы ТГ №47: \blacklozenge - изменение концентрации метана от 0 до 100 об.%; \bullet - изменение концентрации метана от 100 до 0 об.%.

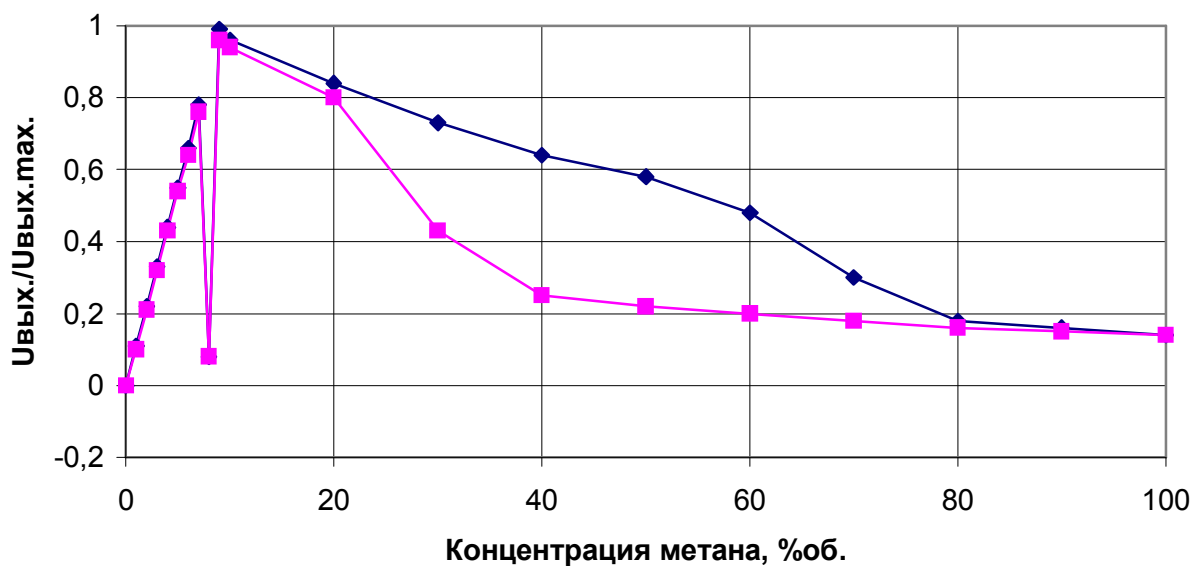


Рис. 2.13. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы №23: \blacklozenge - изменение концентрации метана от 0 до 100 об.%; \bullet - изменение концентрации метана от 100 до 0 об.%.

Как видно из рисунка 2.12 наличие большой петли гистерезиса у термогрупп с инверсией выходного сигнала приводит к весьма значительному расширению зоны неоднозначной работы средств газовой защиты, которая у приведенной термогруппы расширяется вплоть до 30 об.% метана. При этом на участке графика $U_{вых}=f(C)$, где имеются отрицательные значения выходного сигнала датчика, неоднозначность сигнализаторов метана может носить длительный характер, что опасно для жизни персонала, в том числе выходящего из

зоны загазирования в изолирующих самоспасателях и горноспасателей, выполняющих аварийно-спасательные работы. Так, например, при содержании метана 40%об, когда может проявиться неоднозначность, содержание кислорода в атмосфере составляет 12 об.% (см. график 3 рис. 2.3), что смертельно опасно для человека.

Анализ полученных экспериментальных результатов указывает на то, что термokatалитические датчики метана могут иметь широкий спектр характеристик $U_{вых} = f(C)$ как по количественным оценкам, так и по их виду. Это обуславливает трудности при создании, серийном выпуске и эксплуатации однозначных сигнализаторов метана, работающих по фиксированному алгоритму и схеме. В этом случае одним из решений задачи может быть отбор датчиков с определенным видом выходной характеристики, но это дорого и сложно осуществить практически, поскольку можно не получить положительного эффекта, т. к. не известны исследования по изменению количественных оценок и вида характеристик термokatалитических датчиков во времени и от влияющих факторов. Кроме того, неизбежные перегрузки по метану при отборе датчиков могут вывести их из строя. Следовательно, один из путей создания надежно работающего однозначного газоанализатора с фиксированным алгоритмом и схемой - разработка термokatалитического датчика с фиксированной выходной характеристикой для всей совокупности датчиков, приближающейся, например, к виду, приведенному на рис. 2.8. или рис.2.6. В противном случае возможна ситуация, когда однозначный сигнализатор метана может стать неоднозначным при замене в нем датчика в процессе эксплуатации. Другим решением этой задачи может быть создание сигнализатора метана, который работал бы по алгоритму, позволяющему адаптировать прибор к конкретному датчику, или разработка новых простых методов измерения содержания метана в диапазоне от 0 до 100об.%, исключающих неоднозначность измерения содержания метана. Во всех случаях необходимо проведение комплекса исследований термokatалитических датчиков, позволяющих объяснить различие характеристик термогрупп в области высоких концентраций метана и обнаруженное нами явление провала выходной характеристики датчиков метана в области взрывоопасных концентраций, а также найти пути совершенствования средств контроля концентрации метана.

2.4. Исследование инверсии выходного сигнала термokatалитических датчиков метана

В заводских условиях, с целью снижения влияния на работу термokatалитических датчиков изменения напряжения питания, температуры, давления, газового состава и др. неконтролируемых параметров, при изготовлении термогрупп осуществляют подбор пар термоэлементов исходя из реальных характеристик чувствительного и компенсационного элементов. Первоначально подбор пар элементов в основном осуществлялся по величине их сопротивления, измеренном в холодном состоянии. Однако при таком подборе не учитывались отличия тепловой проводимости элементов, которые обуславливались различ-

ной площадью поверхности элементов, формой, расположением, излучающей способностью и др. факторами. Это приводило к тому, что при одинаковой величине начального сопротивления рабочий и сравнительный элементы часто существенно отличались по своим вольтамперным характеристикам, а это, в свою очередь, приводило к нестабильности нулевых показаний при изменении величин неконтролируемых параметров. При таком подборе, для обеспечения требуемых метрологических характеристик измерителей, вынуждены были отбраковывать до 35% термогрупп отличающихся существенным разбросом величины напряжений на элементах термогруппы в разогретом рабочем состоянии.

Для повышения эффективности подбора элементов, снижения величины брака при изготовлении дорогостоящих изделий в последнее время в НПО «Красный металлист» перешли к подбору пар элементов исходя из их параметров в разогретом рабочем состоянии. Подбор осуществляется в следующей последовательности:

- термоэлемент закрепляется между микрозажимами и подключается к источнику стабильного тока с величиной близкой к номинальным режимам работы термогруппы;

- после разогрева термоэлемента измеряется установившееся значение величины напряжения на термоэлементе U_3 ;

- подбор пар термоэлементов осуществляется исходя из максимально возможного соблюдения условия равенства величины напряжения на рабочем и компенсационном элементе в разогретом состоянии

$$U_{рн} = U_{кн} , \quad (2.12)$$

что при последовательном включении элементов обеспечивает равенство в разогретом рабочем состоянии их сопротивлений

$$R_{рн} = R_{кн} . \quad (2.13)$$

Такой подбор позволил значительно улучшить характеристики термогрупп и практически исключить брак при их изготовлении. В идеальном случае для такого подбора зависимость $U_{вых}=f(C)$ при изменении концентрации метана от 0 до 100 об.% должна соответствовать характеристике термогруппы с незначительным сдвигом нуля при 100 об.% метана, приведенной на рис. 2.8. Однако из-за конечного числа термоэлементов в изготовленной и направленной на отбор партии, а также из-за различия в положениях точек сварки платинового микропровода с никелевыми стойками, служащими для крепления термоэлементов, выполнение равенства 2.13 реально невозможно. Для реальных термогрупп всегда характерен некоторый разброс параметров элементов. Кроме того, для термогруппы, идеально подобранной в соответствии с равенством 2.13 не гарантировано равенство таких параметров как величина начального сопротивления, площадь элементов, их форма, расположение относительно стоек, коэффициента черноты и др., которые влияют на мощность выделяемую в элементах при прохождении электрического тока и на условия теплообмена.

В общем случае, через две точки с измеренными значениями тока и напряжения на термоэлементе может проходить множество вольтамперных ха-

рактических (см. рис. 2.14) и даже идеальный подбор элементов, исходя из равенства напряжений на элементах в номинальном режиме разогрева, не гарантирует их однозначности.

Изменение условий теплообмена при переходе от чистого воздуха к метану приведет к существенному смещению вольтамперных характеристик элементов в область более низких величин напряжений. Условно такое возможное смещение вольтамперных характеристик термоэлементов показано на рис. 2.15. Очевидно, что при питании измерительного моста от источника стабильного напряжения величиной $2U_{эн}$, сохранение нулевых показаний при смещении вольтамперных характеристик обеспечивается если точка их пересечения *a* будет смещаться только по горизонтали. В противном случае, в новом установившемся режиме работы при токе I_0 через термоэлементы, произойдет смещение нуля измерительного моста, величина которого определяется разностью напряжений на элементах в этом режиме работы. Для случая питания измерительного моста от источника стабильного тока величиной $I_{эн}$ сохранение нулевых показаний обеспечивается, если точка пересечения характеристик *a* будет смещаться по вертикали.

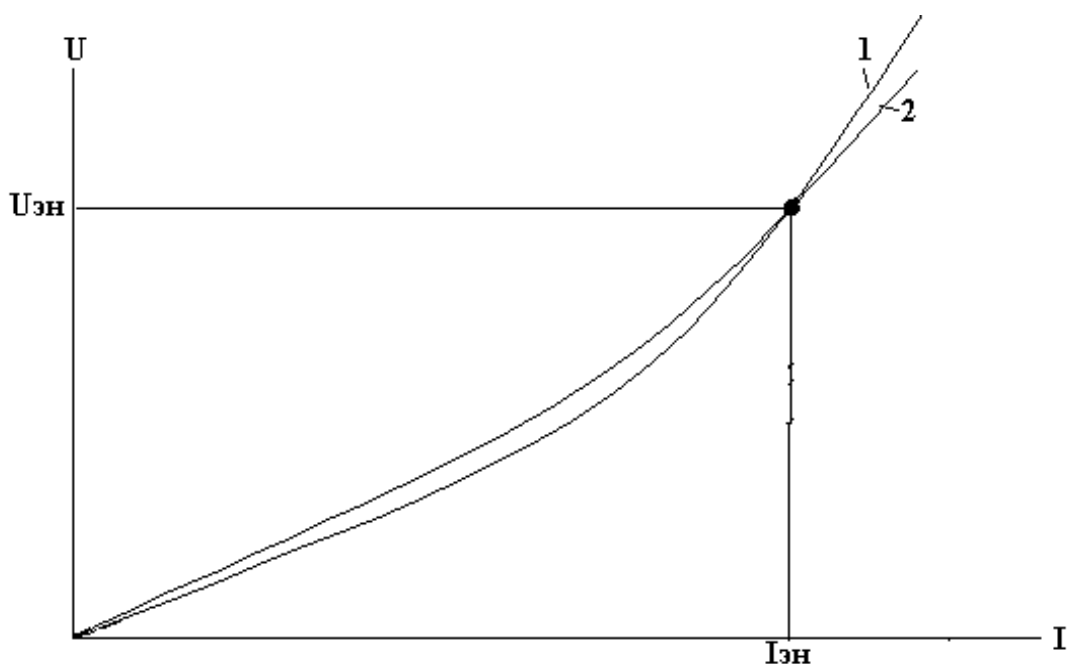


Рис. 2.14. Условные вольтамперные характеристики термоэлементов при их подборе исходя из равенства напряжений в номинальном режиме

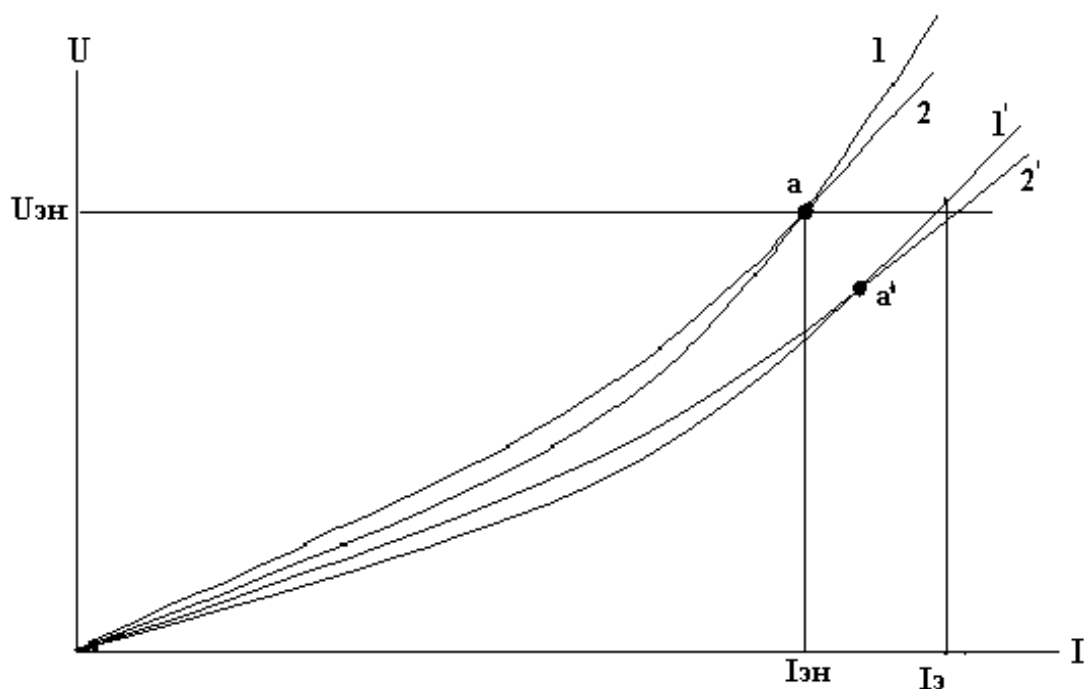


Рис. 2.15. Смещение вольтамперных характеристик термоэлементов при увеличении теплопроводности газа

Учитывая сложный механизм теплообмена, множество влияющих на него факторов, возможный разброс параметров элементов смещение точки пересечения как по горизонтали, так и по вертикали маловероятно. Поэтому и для термогрупп, идеально подобранных в соответствии с равенством 2.13, не гарантировано смещение нулевых показаний при изменении неконтролируемых параметров газовой среды и возникновения инверсии выходного сигнала при высоких концентрациях метана. Исключить смещение нулевых показаний можно в случае подбора элементов термогруппы с идентичными вольтамперными характеристиками. Однако и такой подбор не решает в полном объеме задачи обеспечения однозначности срабатывания защиты при больших концентрациях метана, так как возникновение инверсии выходного сигнала возможно в результате изменения параметров элементов в процессе длительной эксплуатации средств контроля содержания метана.

Для выяснения причин возникновения инверсии выходного сигнала термокаталитических датчиков метана рассмотрим особенности работы термогруппы в чистом воздухе и в метане, при отсутствии реакции каталитического окисления метана на рабочем элементе.

В стационарном режиме теплообмена мощность $P_{\text{э}}$, подводимая к термоэлементу от источника питания, равна сумме мощностей, отводимых от него за счет естественной конвекции и теплопроводности газовой среды, теплового излучения $P_{\text{и}}$ и теплопроводности токопроводящих концов $P_{\text{м}}$. Для упрощения анализа процесса теплообмена теплопередачу за счет естественной конвекции и теплопроводности газовой среды принято рассматривать как обычную кондуктивную теплопередачу $P_{\text{к}}$ через газовую среду с эквивалентным коэффициентом теплопроводности [32]

$$\lambda_{\text{экв}} = \varepsilon_{\kappa} \lambda, \quad (2.14)$$

где ε_{κ} - коэффициент конвекции.

В таком случае теплопередача тепла от термоэлемента согласно закону Ньютона-Рихмана может быть представлена в виде

$$P_{\kappa} = \lambda_{\text{экв}} F_{\text{э}} (t_{\text{э}} - t_{\text{т}}). \quad (2.15)$$

Значение коэффициента конвекции зависит от толщины газовой прослойки δ между термоэлементом и внутренней поверхностью реакционной камеры и может быть определено согласно выражения [32]

$$\varepsilon_{\kappa} = f(Gr Pr), \quad (2.16)$$

где Gr, Pr - соответственно числа Грасгофа и Прандтля, рассчитанные для газовой прослойки при средней температуре $t_{cp} = (t_{\text{э}} + t_{\text{т}}) / 2$;

$t_{\text{т}}$ - температура внутренней поверхностью реакционной камеры, $^{\circ}\text{C}$.

Числа Грасгофа и Прандтля определяются из выражений:

$$Gr = g\delta^2(t_{\text{э}} + t_{\text{т}}) / \nu_{cp}^2(t_{cp} + 273), \quad (2.17)$$

$$Pr = \nu_{cp} a_{cp}, \quad (2.18)$$

где ν_{cp} - коэффициент кинематической вязкости среды при средней температуре, $\text{м}^2/\text{с}$;

$a_{cp} = \lambda_{cp} / C_p \rho_{cp}$ - коэффициент температуропроводности при средней температуре, $\text{м}^2/\text{с}$;

C_p - теплоемкость газа при постоянном давлении, $\text{Дж}/(\text{кг } ^{\circ}\text{C})$;

ρ_{cp} - плотность газа при средней температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$.

При значении величины произведения $Gr Pr < 1000$ принято считать, что перенос тепла осуществляется за счет теплопроводности, а коэффициент конвекции при этом равен единице $\varepsilon_{\kappa} = 1$. В диапазоне значений $10^3 < Gr Pr < 10^6$ величина этого коэффициента рассчитывается по выражению

$$\varepsilon_{\kappa} = 0,105(Gr Pr)^{0,3}. \quad (2.19)$$

Расчеты по приведенным выражениям показывают, что при реальных размерах реакционных камер серийно выпускаемых термокаталитических датчиков величина произведения удовлетворяет неравенству $Gr Pr < 1000$, поэтому можно считать, что перенос тепла через газовую прослойку осуществляется за счет теплопроводности газовой среды.

Тогда, с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности газов (1.7) и выражения (2.15), теплопередача тепла от термоэлемента через газовую прослойку в воздухе будет определяться как

$$P_{\text{кв}} = \lambda_{\text{в0}} \left(\frac{t_{cp} + 273}{273} \right)^{0,82} F_{\text{э}} (t_{\text{э}} - t_{\text{т}}), \quad (2.20)$$

где $\lambda_{в0}$ - теплопроводность воздуха при 0 °С.

Соответственно конвективная теплопередача тепла в метановой среде

$$P_{км} = \lambda_{м0} \left(\frac{t_{ср} + 273}{273} \right)^{1,33} F_9(t_9 - t_2), \quad (2.21)$$

где $\lambda_{м0}$ - теплопроводность метана при 0 °С.

Численный анализ приведенных выражений показывает, что при сохранении номинального температурного режима термоэлемента (например, $t_9 \approx 400^\circ\text{C}$) конвективная теплопередача в метане в 1,6- 1,8 раза возрастает по сравнению с теплопередачей в воздухе.

Мощность, отводимая от термоэлемента за счет излучения, определяется уравнением Стефана-Больцмана [32]

$$P_u = \varepsilon_9 C_0 F_9 (T_9^4 - T_2^4), \quad (2.22)$$

где ε_9 - коэффициент черноты элемента;

$C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м² К⁴);

T_9 и T_2 – соответственно температура элемента и среды, К.

Радиационная составляющая теплового баланса термоэлемента не зависит от изменения теплопроводности среды, однако, существенно зависит от температурного режима термоэлементов. Так, при снижении температуры элемента на 10 °С (с 430 до 420 °С) радиационная компонента уменьшается практически на 6%.

Коэффициент черноты термоэлементов зависит от их цвета и шероховатости поверхности. Для рабочего элемента серийно выпускаемых термогрупп, поверхность которого имеет покрытие в виде платино-палладиевой черни на носителе из γ -окиси алюминия, коэффициент черноты выше чем для сравнительного элемента. По имеющимся экспериментальным данным [30] в интервале температур 360 – 600 °С коэффициент черноты рабочего элемента соответственно составляет 0,98 – 0,87, а сравнительного, не покрытого чернью, - 0,85 – 0,75, что определяет сравнительно большую долю радиационного теплообмена в суммарном тепловом балансе рабочего элемента по сравнению со сравнительным элементом. Учитывая различия в характере зависимости конвективного и радиационного теплообмена от температуры, это обуславливает некоторые отличия их вольтамперных характеристик.

Механизм отвода тепла от термоэлемента через токопроводящие концы является весьма сложным. Он осуществляется за счет теплопроводности концов к держателям термоэлементов, конвективной теплопередачи тепла от нагретых концов в окружающую среду и излучения тепла токопроводящими концами. Следует отметить, что в самих токопроводящих концах, выполненных из платинового микропровода и являющихся естественным продолжением нагревательных элементов, при протекании электрического тока выделяется тепло. Это существенно затрудняет возможность строгого математического описания процесса теплопередачи.

Учитывая невысокое значение коэффициента черноты платины, значительно меньшую площадь излучающей поверхности концов и их более низкую температуру по сравнению с термоэлементами, мощность, излучаемая токопроводящими концами практически на три порядка меньше мощности излучаемой термоэлементами. Поэтому можно принять, что отвод тепла через токопроводящие концы осуществляется в основном за счет их теплопроводности, а также конвективной теплопередачи в окружающую среду. Без учета радиационной составляющей и тепла, выделяемого при протекании электрического тока через токопроводы, задача, связанная с определением теплопередачи от термоэлемента через токопроводящие концы, была решена в [30] исходя из известного решения задачи теплопередачи стержня, закрепленного одним концом в разогретом массиве [32]. Для такого случая, согласно [30], теплопередачу через токопроводящие концы можно выразить в форме закона Ньютона-Рихмана как

$$P_m = \lambda_m F_{\vartheta} (t_{\vartheta} - t_2), \quad (2.23)$$

где λ_m - коэффициент теплоотдачи термоэлементов через токопроводы, Вт/(м²·°С).

При применении токопроводов из платинового микропровода для термоэлементов сферической формы приближенное значение коэффициента теплоотдачи составляет

$$\lambda_m = 1,1 d_m / d_{\vartheta}^2, \quad (2.24)$$

где d_m , d_{ϑ} - соответственно диаметр токопровода и термоэлемента, м.

В таком случае уравнение теплопередачи через токопроводящие концы можно выразить в виде

$$P_m = 1,1 \pi d_m (t_{\vartheta} - t_2). \quad (2.25)$$

С учетом рассмотренных трех составляющих теплообмена уравнения теплового баланса для термоэлемента в воздухе и метане имеют вид

$$P_{\vartheta} = \lambda_{\varepsilon 0} \left(\frac{t_{cp} + 273}{273} \right)^{0,82} F_{\vartheta} (t_{\vartheta} - t_2) + \varepsilon_{\vartheta} C_0 F_{\vartheta} 10^{-8} (T_{\vartheta}^4 - T_2^4) + 1,1 \pi d_m (t_{\vartheta} - t_2). \quad (2.26)$$

$$P_{\vartheta} = \lambda_{\mu 0} \left(\frac{t_{cp} + 273}{273} \right)^{1,33} F_{\vartheta} (t_{\vartheta} - t_2) + \varepsilon_{\vartheta} C_0 F_{\vartheta} 10^{-8} (T_{\vartheta}^4 - T_2^4) + 1,1 \pi d_m (t_{\vartheta} - t_2). \quad (2.27)$$

Все переменные величины, входящие в уравнения (2.26) и (2.27), могут быть выражены через значение тока и напряжения на термоэлементе

$$P_{\vartheta} = U_{\vartheta} I_{\vartheta}; \quad t_{cp} = (t_{\vartheta} + t_2) / 2; \quad T_{\vartheta} = t_{\vartheta} + 273; \quad t_{\vartheta} = (U_{\vartheta} - R_{\vartheta 0} I_{\vartheta}) / I_{\vartheta} \beta_{\vartheta} R_{\vartheta 0}$$

Тогда уравнения (2.26) и (2.27) будут иметь вид

$$U_3 I_3 = \lambda_{60} \left(\frac{((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30}) + t_2 + 546}{546} \right)^{0,82} F_3 ((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30}) - t_2 + \varepsilon_3 C_0 F_3 10^{-8} ((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30})^4 - (t_2 + 273)^4 + 1,1 \pi d_m ((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30}) - t_2 \quad (2.28)$$

$$U_3 I_3 = \lambda_{m0} \left(\frac{((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30}) + t_2 + 546}{546} \right)^{1,33} F_3 ((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30}) - t_2 + \varepsilon_3 C_0 F_3 10^{-8} ((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30})^4 - (t_2 + 273)^4 + 1,1 \pi d_m ((U_3 - R_{30} I_3) / I_3 \beta_3 R_{30}) - t_2 \quad (2.29)$$

Приведенные уравнения в неявном виде описывают вольтамперную характеристику термоэлементов в чистом воздухе и метане. Получить решение выражений относительно напряжения на термоэлементе вида $U_3 = f(I_3)$ без существенных упрощений уравнений невозможно. Поэтому для построения вольтамперных характеристик целесообразно использование численных методов.

На рис. 2.16 приведены вольтамперные характеристики термоэлемента с параметрами характерными для элементов серийно изготовленных термогрупп для стационарных анализаторов метана, рассчитанные по выражениям (2.28) и (2.29), при его нахождении в чистом воздухе и метане при $t_2 = 25^0 C$, для случаев, когда его поверхность не пропитана платино-палладиевой чернью и после пропитки. Коэффициент черноты термоэлемента при расчетах соответственно принимался 0,8 и 0,95. На рис. 2.17 в увеличенном масштабе приведен участок этих же характеристик в зоне близкой к номинальным режимам работы термогруппы в аппаратуре.

Как видно из рис. 2.16 и 2.17 при одинаковых параметрах термоэлементов вольтамперная характеристика черного элемента за счет более интенсивного радиационного теплообмена как в воздухе так и в метане заметно смещается вниз, начиная с величины тока 120 мА. В воздухе, при номинальном токе питания термогруппы 185 мА, это смещение составляет около 50 мВ, а в метане – около 35 мВ. Очевидно, что сближение вольтамперных характеристик элементов в метане (при одной и той же величине тока) обусловлено снижением доли радиационного теплообмена элементов в среде с большим коэффициентом теплопроводности, из-за существенного снижения температуры их разогрева.

Отличие вольтамперных характеристик белого и черного термоэлементов заранее предопределяет то, что при подборе термогрупп исходя из равенства величины напряжения на элементах в номинальном режиме, белый и черный элемент отличаются друг от друга каким либо конструктивным параметром, например площадью поверхности. На рис. 2.18 приведены вольтамперные характеристики белого и черного элемента с меньшей площадью поверхности (на 3%), подобранные таким образом, чтобы они пересекались при токе $I_3=185$ мА, а на рис. 2.19 в увеличенном масштабе приведен участок этих же характеристик в зоне близкой к номинальным режимам работы термогруппы в аппаратуре.

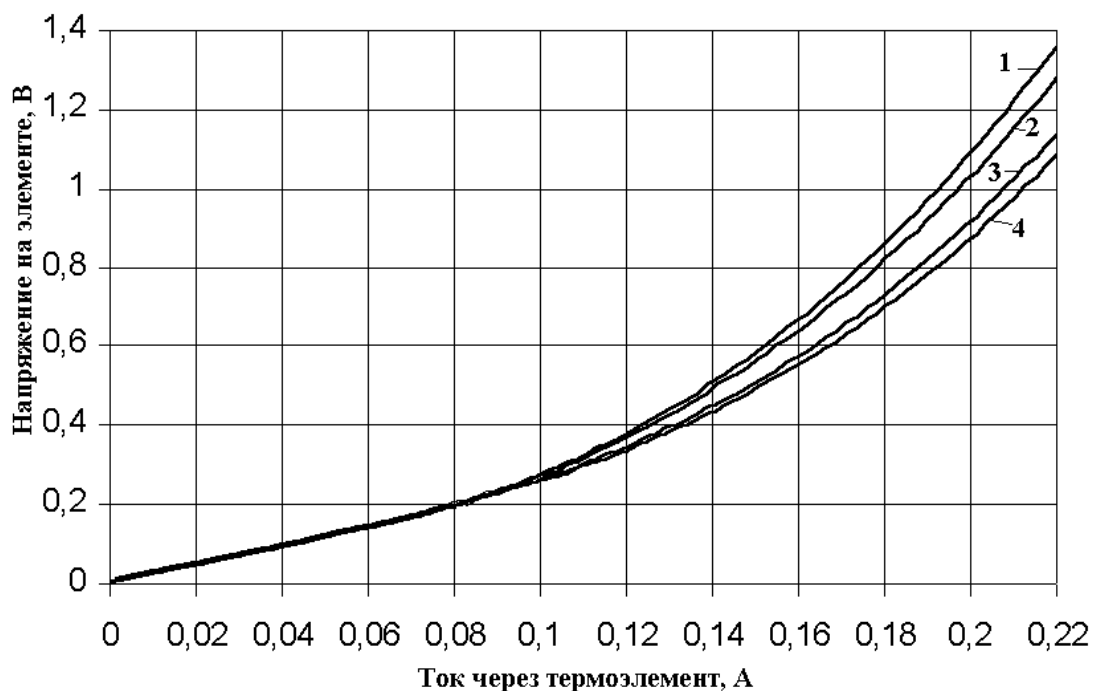


Рис. 2.16. Вольтамперные характеристики термоэлемента: 1 и 3 – до пропитки катализатором (белого), соответственно, в воздухе и метане; 2 и 4 - после пропитки катализатором (черного), соответственно, в воздухе и метане

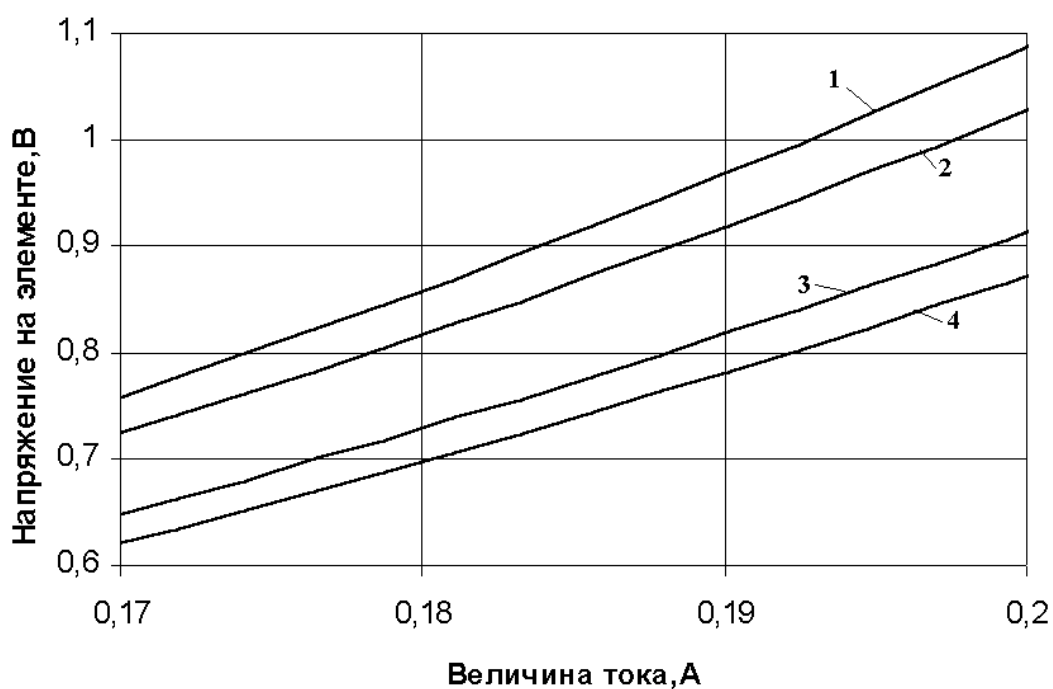


Рис. 2.17. Вольтамперные характеристики термоэлемента в зоне близкой к номинальным режимам работы: 1 и 3 – белого, соответственно, в воздухе и метане; 2 и 4 - черного, соответственно, в воздухе и метане

Как видно из рис. 2.17 и рис. 2.18 вольтамперные характеристики элементов, подобранных из условия равенства напряжения на элементах, являются неидентичными. При токах через термогруппу меньше номинального в такой

термогруппе напряжение на рабочем элементе превышает напряжение на компенсационном элементе. При режимах питания термогруппы выше номинального наблюдается обратное явление. Такой характер зависимости обуславливает смещение нулевых показаний при изменении параметров среды или источника питания.

Для выяснения характера этого смещения рассмотрим, как изменяются характеристики подобранных термоэлементов при замене воздуха на метан. На рис. 2.20 приведены вольтамперные характеристики элементов в метане в зоне близкой к номинальным режимам работы, рассчитанные при тех же параметрах термоэлементов, что и характеристики, приведенные на рис. 2.18.

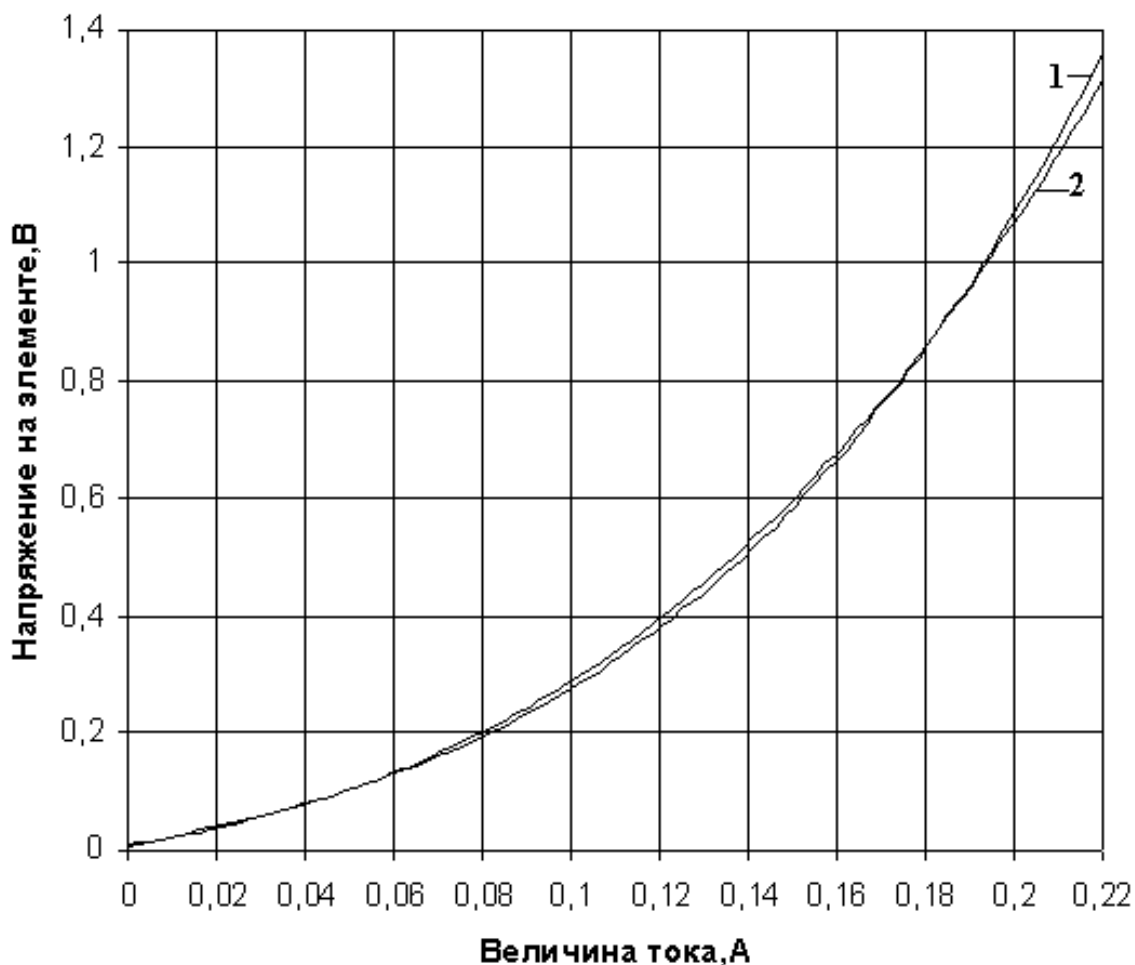


Рис. 2.18. Вольтамперные характеристики термоэлементов, подобранных в термогруппу исходя из равенства напряжения на элементах, в воздухе: 1 – белого; 2 - черного с меньшей на 3% площадью поверхности.

Как видно из рисунков 2.19 и 2.20 точка пересечения вольтамперных характеристик подобранных термоэлементов в метане существенно сместилась (с $I_0 = 185\text{мА}$; $U_0 = 0,95\text{В}$ в воздухе до $I_0 = 198\text{мА}$; $U_0 = 0,88\text{В}$ в среде метана), что приводит к смещению нуля термогруппы. Причем величина и характер этого смещения зависит от режима питания термогруппы. Так, из анализа кривых на рисунках видно, что при питании термогруппы от источника стабильного напряжения с величиной напряжения $U_0 = 1,9\text{В}$ (соответствует удвоенному на-

пряжению на элементах в точке пересечения характеристик в воздухе) будет наблюдаться инверсия выходного напряжения термогруппы в метане на величину примерно - 8 мВ. Инверсия выходного напряжения обусловлена тем, что в метане при токе $I_s = 185 \text{ мА}$ напряжение на рабочем элементе превышает напряжение на компенсационном элементе (см. рис 2.20). Учитывая то, что питание термогрупп в серийно выпускаемых изделиях осуществляется от источника стабильного напряжения, инверсия выходного напряжения термогруппы при больших концентрациях метана должна быть типичной для всех средств контроля.

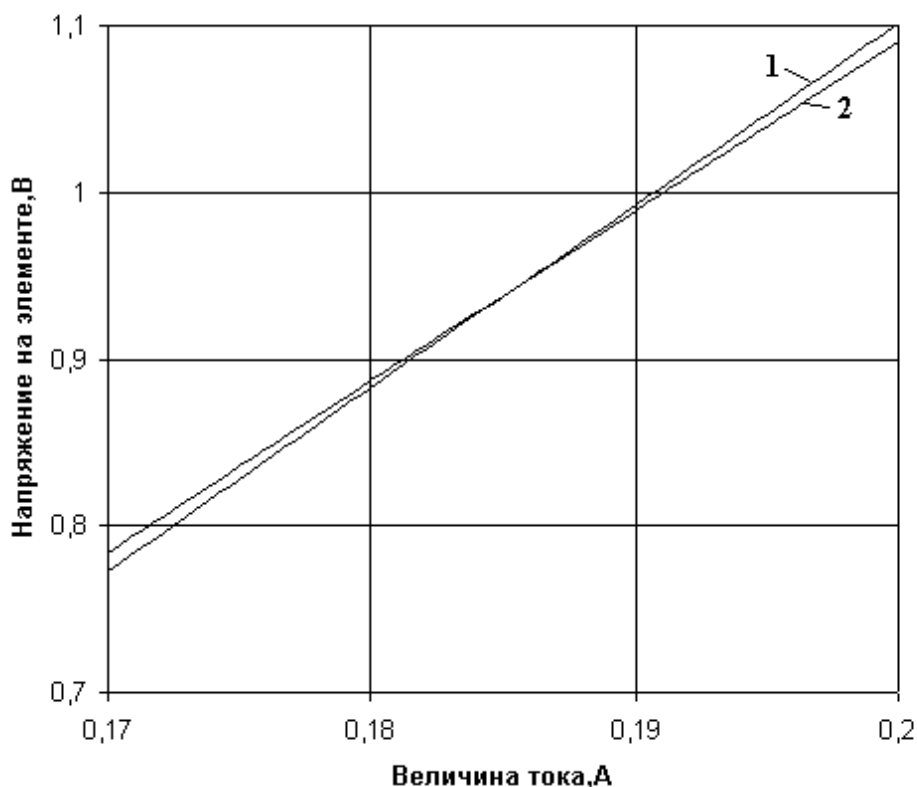


Рис. 2.19. Вольтамперные характеристики подобранных термоэлементов в зоне близкой к номинальным режимам работы (воздух): 1 – белого; 2 - черного с меньшей на 3% площадью поверхности.

При питании термогруппы от источника стабильного тока значением $I_s = 185 \text{ мА}$ (соответствует величине тока в точке пересечения характеристик в воздухе) наоборот, будет наблюдаться положительное смещение выходного напряжения термогруппы в метане на величину около 8 мВ. Этот факт позволяет рекомендовать такой режим питания для исключения случаев инверсии выходного сигнала и предотвращения неоднозначности срабатывания защиты.

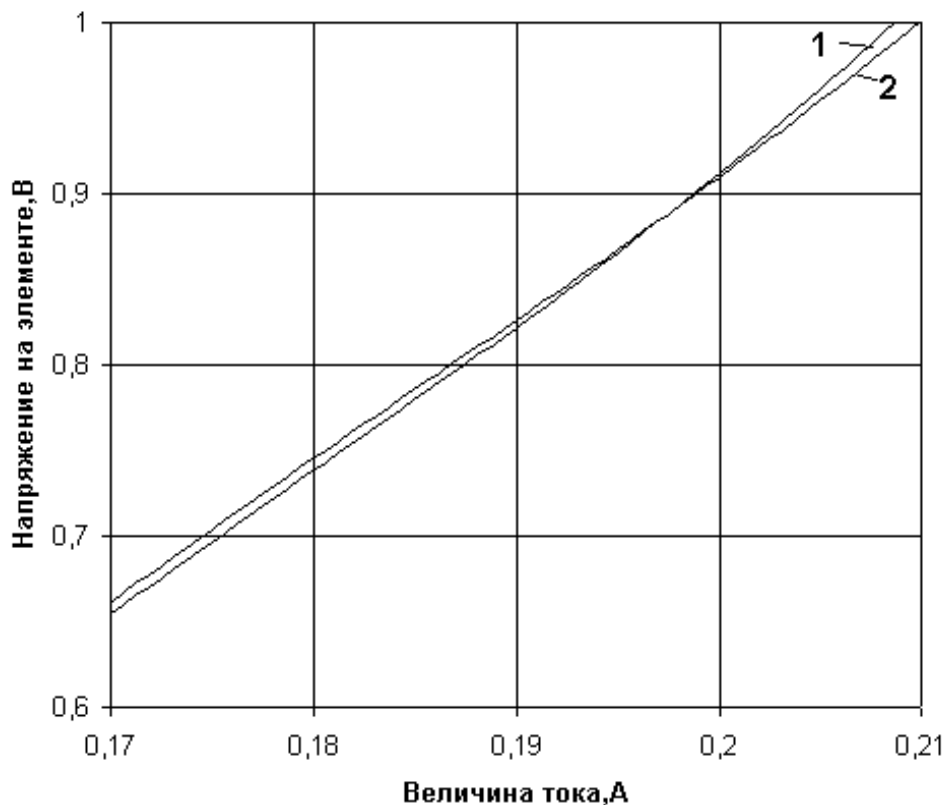


Рис. 2.20. Вольтамперные характеристики подобранных термозащитных элементов в зоне близкой к номинальным режимам работы (метан): 1 – белого; 2 - черного с меньшей на 3% площадью поверхности.

Характерным является, то, что точки пересечения вольтамперных характеристик термозащитных элементов в воздухе и метане характеризуются постоянной величиной мощности выделяемой на элементах:

- в воздухе $P_э = I_э U_э = 0,185 * 0,95 = 0,175 \text{ Вт}$;

- в метане $P_э = I_э U_э = 0,198 * 0,88 = 0,175 \text{ Вт}$.

Для выяснения универсальности этого явления, были выполнены аналогичные расчеты для термогрупп с отличающимися начальными условиями, в том числе с параметрами характерными для сигнализаторов метана (диаметр платинового микропровода 20 мкм), а также при условиях подбора элементов с равной площадью поверхности, но с несколько большим сопротивлением рабочего элемента. Они показали, что во всех случаях, точки пересечения вольтамперных характеристик подобранных термозащитных элементов характеризуются постоянством выделяемой мощности. Это указывает на возможность исключения ухода нуля термогрупп, элементы которых подобраны по величине напряжения в горячем состоянии, при их питании в режиме стабилизации потребляемой мощности.

2.5. Исследование сдвига выходного сигнала датчиков метана в область положительных значений

Выполненный теоретический анализ позволил объяснить причины возникновения инверсии выходного сигнала у существующих средств контроля метана при высоких концентрациях метана, однако он не объясняет причин возникновения положительного сдвига выходного сигнала у 30% исследованных термогрупп в этих условиях. Очевидно, что причины этого явления заключаются в значительном разбросе параметров и характеристик подобранных элементов. Для пояснения природы и выяснения механизма этого сдвига нами проведены исследования термогрупп, для которых характерен значительный положительный сдвиг и их сравнение с термогруппами, для которых характерна инверсия выходного сигнала.

При подборе термоэлементов в термогруппы исходя из их параметров в разогретом рабочем состоянии, характеристики термоэлемента измеряются при его закреплении в микрозажимах. В последствии, после приваривания подобранных термоэлементов к стойкам датчика, из-за неоднозначности положения точек приваривания на поверхности стоек, различного положения термоэлемента в плоскости камеры, возможного провисания элементов, практически всегда возникает некоторый разброс величины напряжений на рабочем и сравнительном элементе термогруппы при питании ее током, соответствующим номинальному режиму работы. Техническими условиями [74] допускается использование в анализаторах метана термогрупп, для которых разброс величины напряжения на элементах в номинальном режиме работы не превышает 50 мВ. Проверка исследованных термогрупп показала, что максимальная величина разброса напряжения на их элементах не превышает 48 мВ. У всех термогрупп, для которых характерным является положительный сдвиг выходного сигнала в метане, напряжение на сравнительном элементе в номинальном режиме существенно (20 – 45 мВ) превышает напряжение на рабочем элементе. Для термогрупп с инверсией выходного сигнала характерен незначительный разброс напряжений или более высокое напряжение на рабочем элементе, чем напряжение на сравнительном элементе. Для термогрупп с незначительным сдвигом нуля в метане характерным является на 5–15 мВ большая величина напряжения на сравнительном элементе, чем на рабочем.

На рис. 2.21 приведены вольтамперные характеристики элементов термогруппы № 18 экспериментально снятые в воздухе и метане (нижние кривые) при $t_2 = 20^{\circ}C$.

Из рис. 2.21 видно, что вольтамперные характеристики элементов не пересекаются. Для установления нуля мостовой измерительной схемы, например при токе через термоэлементы 180 мА, требуется смещение потенциала точки В мостовой измерительной схемы (см. рис. 2.1) на 45 мВ. Условно процесс установления нуля можно представить как эквивалентное смещение вольтамперной характеристики рабочего элемента на такое же напряжение (см. рис. 2.22).

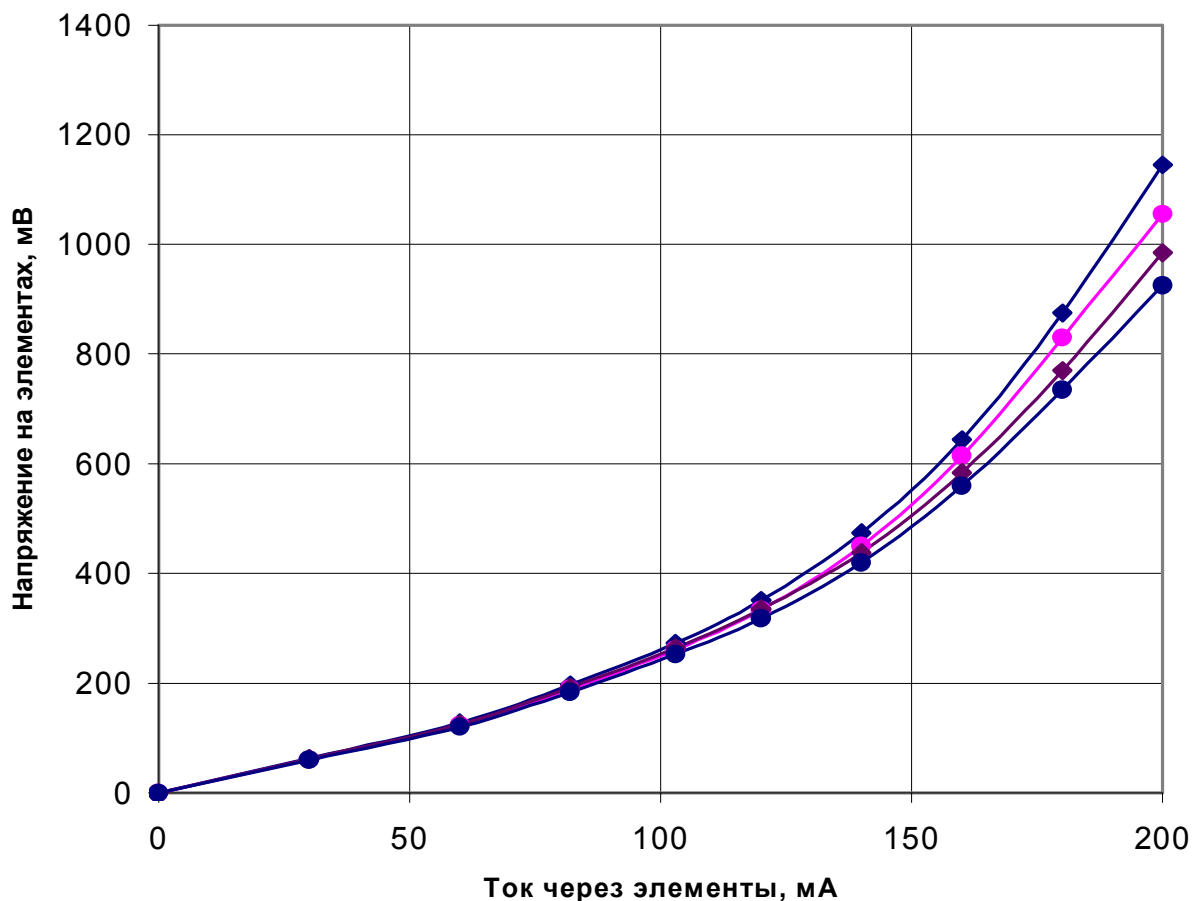


Рис. 2.21. Экспериментальные вольтамперные характеристики элементов (ТГ № 18) в воздухе (верхние) и метане (нижние): ◆ - компенсационный элемент; ● - рабочий элемент

Как видно из рис. 2.22, при такой величине смещения характеристики рабочего элемента и компенсационного элемента пересекаются в точке $I_s = 180 \text{ мА}$; $U_s = 875 \text{ мВ}$. Для большей наглядности на рис. 2.23 в увеличенном масштабе приведен участок характеристик в зоне близкой к номинальным режимам работы термогруппы в воздухе (верхние кривые) и метане (нижние кривые), при смещении характеристики рабочего элемента на 45 мВ.

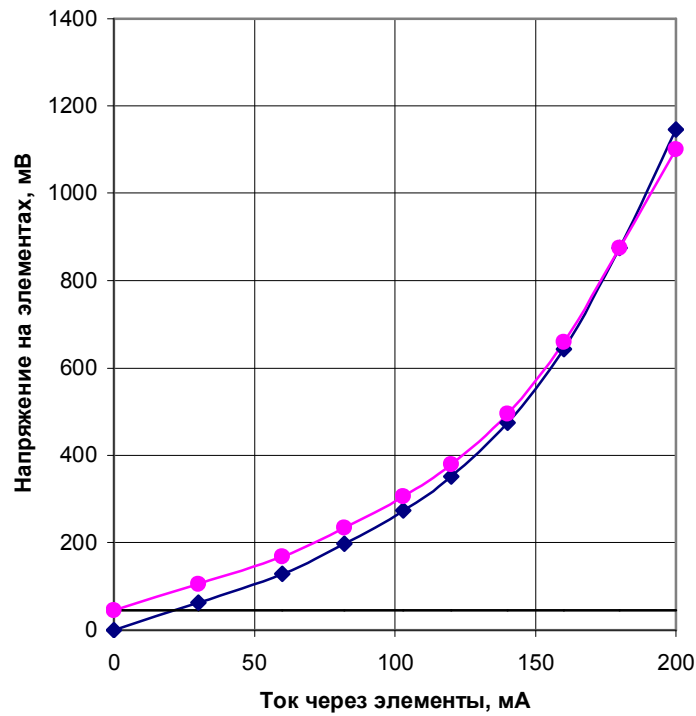


Рис. 2.22. Вольтамперные характеристики элементов в воздухе (ТГ № 18) при смещении на 45 мВ характеристики рабочего элемента: ◆ - компенсационный элемент: ● - рабочий элемент.

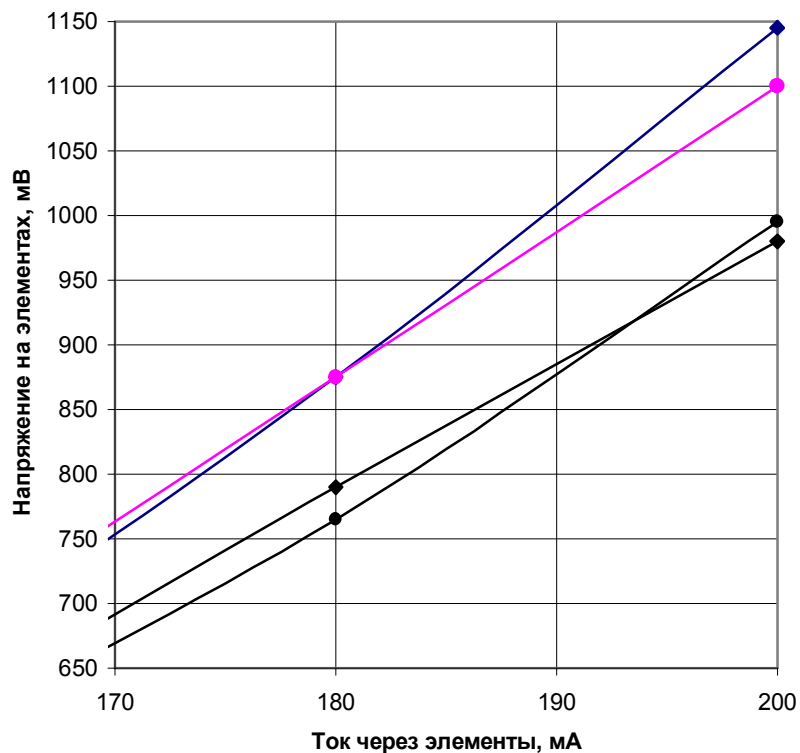


Рис. 2.23. Вольтамперные характеристики элементов в воздухе (ТГ № 18) при смещении на 45 мВ характеристики рабочего элемента: ◆ - компенсационный элемент: ● - рабочий элемент

Как видно из рис. 2.23, в метане характеристики рабочего элемента и компенсационного элемента пересекаются в точке $I_s = 198 \text{ мА}$; $U_s = 920 \text{ мВ}$. Величина смещения точки пересечения кривых в метане по отношению к воздуху зависит, а характер смещения не зависит от режима питания термогруппы. При питании термогруппы от источника стабильного напряжения с величиной напряжения $U_s = 1,75 \text{ В}$ (соответствует удвоенному напряжению на элементах в точке пересечения характеристик в воздухе) будет наблюдаться положительное смещение выходного напряжения термогруппы в метане на величину примерно +14 мВ. При питании термогруппы от источника стабильного тока значением $I_s = 180 \text{ мА}$ (соответствует величине тока в точке пересечения характеристик в воздухе) положительное смещение выходного напряжения термогруппы в метане увеличивается и достигает +26 мВ. Для таких термогрупп точки пересечения вольтамперных характеристик термоэлементов в воздухе и метане характеризуются непостоянной величиной мощности, выделяемой на элементах:

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что для 30% средств контроля метана, в которых используются термогруппы, характеризующихся существенным сдвигом выходного сигнала в область положительных значений при $C = 100 \text{ об. \%}$, обеспечивается однозначность срабатывания защиты в области высоких концентраций метана при испытаниях в соответствии с ГОСТ [54]. Однако для всех этих термогрупп характерным является то, что напряжение на сравнительном элементе в номинальном режиме существенно (20 – 45 мВ) превышает напряжение на рабочем элементе.

С точки зрения обеспечения однозначности срабатывания защиты при высоких концентрациях метана такие термогруппы являются предпочтительными и с целью обеспечения однозначности можно было бы рекомендовать при подборе элементов термогрупп заранее предусматривать компоновку пар с неоднозначной величиной напряжения на сравнительном и рабочем элементах. Однако существенный сдвиг характеристик термоэлементов в измерительном мосте всегда свидетельствует о плохой его сбалансированности, что может повлечь за собой ухудшение метрологических характеристик при контроле малых дозрывных концентраций метана.

2.6. Исследование неоднозначности характеристик датчиков в области высоких его концентраций метана

Как было показано ранее у некоторых термогрупп (до 10%) в области от 50 до 70 об.% метана наблюдается существенное увеличение крутизны характеристики $U_{\text{вых}} = f(C)$ с последующим ее выполаживанием (см. рис. 2.9 и рис. 2.10). Причем для этих же термогрупп характерно появление значительного гистерезиса показаний при изменении концентрации метана от 100 об.% до 0 (см. рис. 2.12 и 2.13).

Для выяснения причин этого явления нами был выполнен сопоставительный анализ конструктивных и электрических параметров термогрупп. Он показал, что часть рабочих и сравнительных элементов в термогруппах, для кото-

рых характерны выше указанные явления, имеют несколько большие начальные сопротивления термоэлементов, по сравнению с элементами остальных термогрупп. Учитывая то, что при исследовании термогрупп и при их использовании в средствах контроля метана питание измерительного моста осуществляется от источника стабильного напряжения, это может обуславливать более низкую температуру предварительного рабочего элемента. В таком случае увеличение крутизны характеристики $U_{вых}=f(C)$ в области концентраций метана свыше 60 об.% может быть связано со снижением температуры элементов, вследствие охлаждающего действия метана и переходом реакции каталитического окисления метана с диффузионной области в кинетическую.

Для подтверждения этого предположения при $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$ были сняты вольтамперные характеристики в воздухе и метане для термогрупп, которые характеризуются существенным изменением крутизны характеристики $U_{вых}=f(C)$ и значительным гистерезисом, а также термогрупп для которых эти явления не характерны. Затем, с учетом выражения (2.7), исходя из значения сопротивления элементов при номинальной величине напряжения питания термогруппы в стационарных анализаторах и сигнализаторах метана, рассчитано значение температуры разогретых рабочих элементов в воздухе и метане,

$$t_3 = \frac{U_3 / I_3 - R_{30}}{\beta_3 R_{30}}. \quad (2.30)$$

Данные измерения и расчетов для некоторых термогрупп приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Экспериментальные и расчетные параметры рабочих термоэлементов термогрупп

№	Наименование параметра	Единицы измерений	Значения параметра для термогрупп					
			с гистерезисом показаний				типовых	
			№7	№23	№26	№47	№29	№54
1	R_{30}	Ом	2,023	2,012	2,024	2,016	1,882	1,898
2	U_3	мВ	900	900	900	900	900	900
3	I_3 в воздухе	мА	182,1	183,0	183,4	182,3	183,9	181,4
4	I_3 в метане	мА	192,4	193,2	194,1	193,7	194,2	192,3
5	t_3 в воздухе	$^{\circ}\text{C}$	364,4	361,1	361,5	359,8	399,7	403,5
6	t_3 в метане	$^{\circ}\text{C}$	329,3	329,4	323,0	326,2	366,3	366,4

Как видно из табл. 2.1 температура рабочих элементов термогрупп со значительным гистерезисом показаний в воздухе фактически находится на уровне, соответствующем началу диффузионной области для платино-палладиевых катализаторов на γ -окиси алюминия.

В метане, при сохранении стабильной величины напряжения, температура рабочего элемента снижается в среднем на 35°C . При таких температурах начального разогрева элементов термокаталитическая реакция прекращается

или протекает с низкой скоростью реакции в кинетической области [30]. При изменении концентрации метана от 100 об.% до 0 заметное выделение тепла и, следовательно дополнительный разогрев рабочего элемента вследствие окисления метана, наблюдаются при температуре рабочего элемента более 340 - 345 °С. Такая температура рабочего элемента достигается при снижении концентрации метана до 40 – 60 об.%. Поэтому, до достижения указанной концентрации, угол наклона кривой $U_{вых}=f(C)$ незначительный, его величина определяется вялотекущим процессом окисления метана в кинетической области. По мере разогрева рабочего элемента вследствие снижения теплопроводности среды и увеличения скорости каталитической реакции в диапазоне концентраций метана 40 – 60 об.% возникают условия для процесса нарастающего саморазогрева, что сопровождается резким ростом угла наклона кривой $U_{вых}=f(C)$. Процесс нарастающего саморазогрева протекает до тех пор, пока реакция окисления метана на рабочем элементе не перейдет в диффузионную область и кривые прямой и обратной ветви характеристики $U_{вых}=f(C)$ не сблизятся.

Существенным снижением температуры рабочего элемента объясняется и изменение крутизны прямой ветви характеристики. Однако в отличие от рассмотренного случая, перелом кривой $U_{вых}=f(C)$ в при прямом ходе наступает при гораздо более высоких концентрациях метана, чем при обратном. Это объясняется тем что вследствие большого количества тепла, выделяющегося на рабочем элементе в результате окисления метана температура элемента сохраняется высокой (достаточной для протекания реакции окисления метана в диффузионной области) вплоть до величин концентраций 60 – 80 об.%. При дальнейшем росте концентрации наступают условия, когда за счет дополнительного охлаждения элемента метаном и снижения тепла от окисления метана (обусловленного уменьшением содержания лимитирующего агента – кислорода) температура снижается настолько, что реакция окисления переходит в кинетическую область. Переход в реакции в эту область существенно снижает ее скорость, что, в свою очередь, уменьшает разогрев элемента от окисления метана, еще более снижает скорость реакции окисления и обуславливает резкий спад кривой $U_{вых}=f(C)$.

Для подтверждения описанного механизма возникновения гистерезиса и нелинейности характеристики в области высоких концентраций метана были сняты экспериментальные зависимости $U_{вых}=f(C)$, в диапазоне изменения C от 0 до 100 и от 100 до 0 об.% для термогруппы №47 при ее питании напряжением выше номинального, что обеспечивает более высокую температуру предварительного разогрева рабочего элемента и исключает возможность протекания реакции окисления в кинетической области. На рис. 2.24 приведена зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы №47, полученная при напряжении питания термогруппы 2,0 В, что обеспечило предварительный разогрев рабочего элемента в воздухе до 395,9 °С, а в метане – до 361,0 °С.

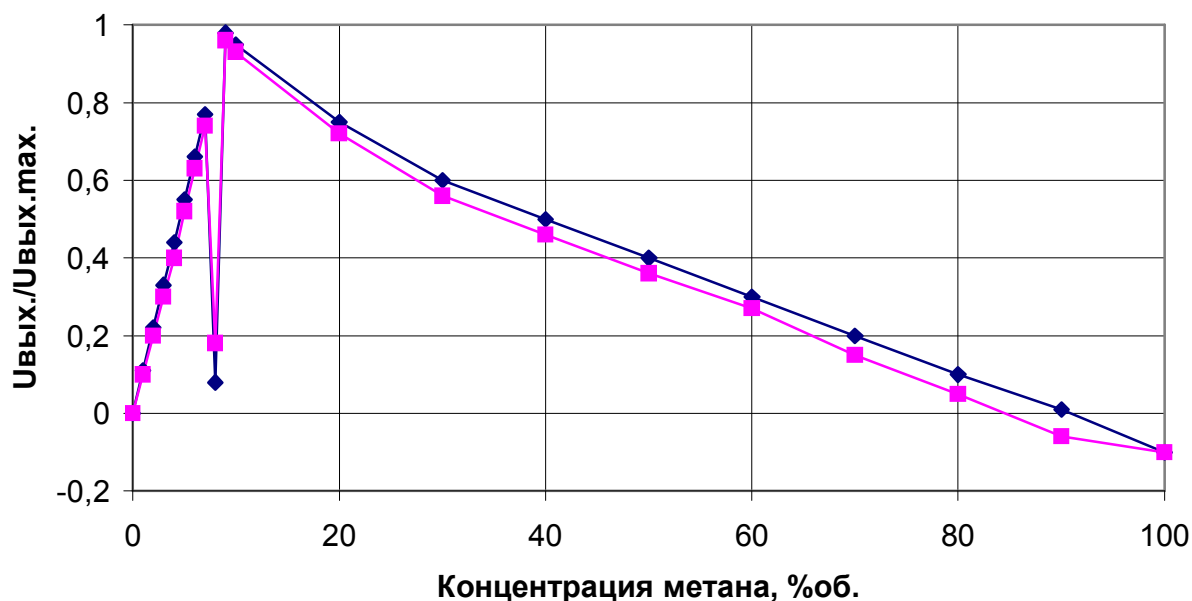


Рис. 2.24. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ при повышенном напряжении питания (ТГ №47): \blacklozenge - изменение концентрации метана от 0 до 100 об.%; \bullet - изменение концентрации метана от 100 до 0 об.%

Как видно с рис. 2.24 повышение температуры предварительного разогрева рабочего элемента приводит к выравниванию характеристики $U_{вых}=f(C)$ и практически устраняет гистерезис показаний в области высоких концентраций. Ввиду возможного перегрева основной части термоэлементов с более высокими температурами начального разогрева, повышенного их износа и возможного возникновения нелинейности при измерении взрывных концентраций метана, повышать напряжение питания термогрупп в серийно изготавливаемых изделиях нецелесообразно. Поэтому после изготовления термогрупп целесообразно определять температуру предварительного разогрева рабочего элемента в воздухе при нормальных условиях эксплуатации и производить отбраковку термогрупп если она составляет ниже 390°C или предусматривать автоматический выбор режима питания термогруппы в зависимости от параметров рабочего элемента, что может быть реализовано при применении микропроцессорных средств контроля.

2.7. Исследование провала выходной характеристики в области взрывных концентраций

Обнаруженное при исследованиях явление резкого уменьшения выходного сигнала (провал выходной характеристики) в области взрывных концентраций метана может привести к включению защищаемого электрооборудования на аварийном участке при наличии взрывоопасной концентрации метана и, как следствие, к взрыву метановоздушной смеси. С целью выяснения причин и особенностей проявления обнаруженного явления, установления его универсальности были проведены экспериментальные исследования особенностей ра-

боты термокаталитических датчиков в области провала выходной характеристики.

Программа исследований включала:

- наблюдение за работой датчиков при содержании метана в смеси соответствующем концентрации метана в зоне наблюдаемого провала выходной характеристики;

- исследование мостовой измерительной схемы с термокаталитическим датчиком при замене сравнительного элемента постоянным резистором;

- установление характера зависимости $U_{вых}=f(C)$ для термокаталитических датчиков изготавливаемых другими производителями.

Учитывая то, что при использовании синтезатора газовых смесей для подачи смесей к испытываемой термогруппе концентрация метана в смеси флуктуирует около среднего значения и величина отклонений может составлять $\pm 0,2$ об.%, первоначально наблюдение за работой датчиков в области провала выходной характеристики предполагалось осуществлять путем подачи в испытательную камеру аттестованных газовых смесей с концентрацией близкой к области провала и снятия при этом $U_{вых}=f(C)$ в зоне провала. Однако, при подаче в камеру аттестованных газовых смесей в диапазоне концентраций от 7 до 9 об.% провал выходной характеристики не наблюдался. Попытка осуществить подбор концентрации смеси в баллоне, при которой наблюдается резкое уменьшение выходного сигнала, не дала результатов. Это свидетельствует о том, что обнаруженное явление провала характеристики является весьма неустойчивым, а провал происходит только при определенных соотношениях воздуха и метана и четко наблюдается только в случае перехода через зону провала при постепенном повышении или снижении концентрации метана, то есть в динамическом режиме. Поэтому окончательно была принята методика наблюдений, используемая при снятии зависимостей $U_{вых}=f(C)$ (см. раздел 2.2), отличающаяся тем, что диапазон изменения концентраций был выбран от 7 до 9 об.% и наоборот, с градациями 0,2 – 0,4 об.%, величина которых обуславливалась техническими возможностями используемого синтезатора. При попадании в зону провала, концентрация метана в испытательной камере поддерживалась неизменной или изменялась на одну ступень в зависимости от характера изменения выходного сигнала. Для наблюдений было отобрано по 6 термогрупп, используемых в стационарных средствах контроля и сигнализаторах метана. Вначале исследования производились при номинальных режимах питания термогрупп, а в последующем, с целью выяснения возможного влияния режима работы термоэлементов на характер протекания явления, при отклонениях напряжения питания датчиков от номинального на $\pm 10\%$.

Проведенные исследования показали, что в динамическом режиме, независимо от конструктивных особенностей термокаталитического датчика и режима его работы провал выходной характеристики в области взрывных концентраций всегда наблюдается при достижении концентрации около 8,5 об.% как при росте так и при снижении концентрации метана в измерительной камере. Явление резкого уменьшения выходного сигнала является весьма неустойчивым. Как правило, при переходе концентрации через 8,5 об.% в течении 20 – 30

с напряжением выходного сигнала уменьшается до уровня 0,05 – 0,2 от его первоначальной величины, с последующим быстрым восстановлением до первоначального уровня. Следует также отметить, что провал характеристики датчика в области взрывных концентраций более явно выражен при изменении содержания метана из области более высоких концентраций к низким.

В статическом режиме, как правило, не удается найти и поддерживать такую концентрацию метана, чтобы на выходе измерительного моста длительное время поддерживалось напряжение соответствующее минимальному напряжению при провале выходной характеристики. В то же время, в некоторых случаях, удавалось с помощью синтезатора газовых смесей поддерживать в статическом режиме концентрацию метана, при которой длительное время наблюдался процесс постоянного срыва выходного сигнала измерительного моста. В одних случаях этот процесс имел циклический характер, который проявляется в том, что в течение 5-25с (при постоянной концентрации метана) напряжение выходного сигнала уменьшается до уровня 0,4-0,05 от первоначальной величины. Затем в последующих 2-4 циклах изменение сигнала уменьшается, и он восстанавливается на уровне 0,8-0,95 до первоначальной величины. В других случаях отмечался провал выходной характеристики датчика даже в область отрицательных значений выходного сигнала (до уровня $-0,05$ от первоначальной величины) и сохранение такого провала от десятков секунд до нескольких минут.

Очевидно, что возможность наблюдения явления в статическом режиме и его периодический характер обуславливаются наличием флуктуации концентрации метана на выходе из синтезатора газовых смесей вокруг среднего его значения. При этом глубина провалов и их длительность обуславливаются степенью совпадения средней концентрации метана в смеси и величины концентрации, при переходе через которую, происходит провал выходной характеристики.

Предположительной причиной провала зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ в области взрывных концентраций метана могло быть его окисление на компенсационном элементе. Для проверки этого предположения в схему датчика (рис.2.1) вместо компенсационного элемента R_k в измерительную схему был включен магазин сопротивлений и с его помощью устанавливалась величина сопротивления $R=R_k$, которая определялась из зависимости:

$$R = U_k / I_n \quad (2.31)$$

где U_k - падение напряжения на сравнительном элементе R_k датчика при номинальном токе через датчик I_n в воздухе.

Для этой схемы также снималась характеристика $U_{\text{вых}}=f(C)$ при изменении концентрации метана от 0 до 100 %об и обратно. Зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$, построенная по экспериментальным данным для термогруппы №3 при питании мостовой измерительной схемы номинальным напряжением приведена на рис. 2.25.

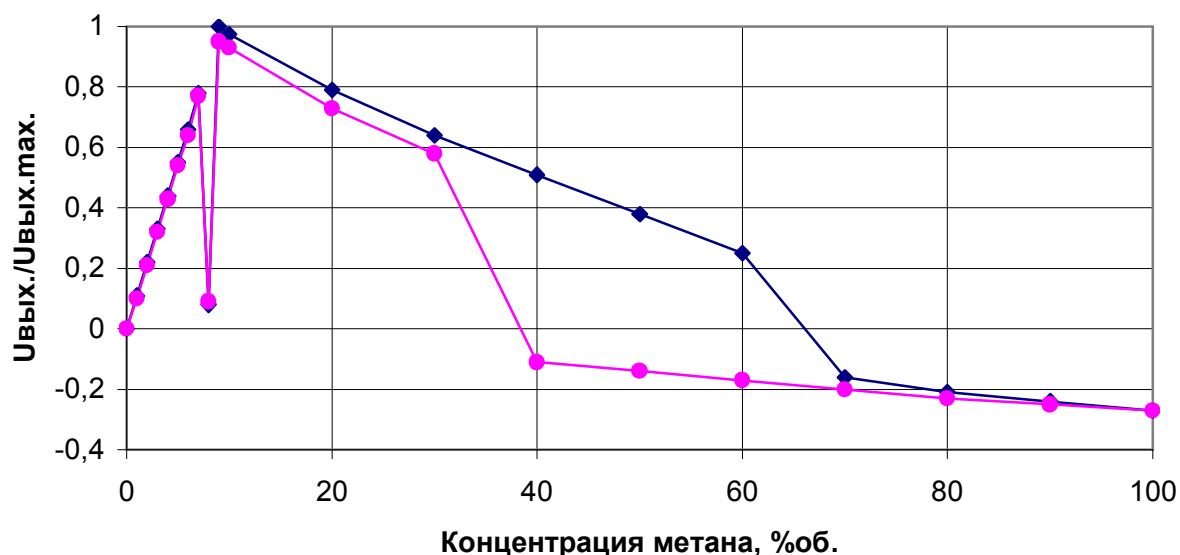


Рис.2.25. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы при замене сравнительного элемента магазином сопротивления (ТГ №3): ♦ - изменение концентрации метана от 0 до 100 об.%; • - изменение концентрации метана от 100 до 0 об.%.

Качественно зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы при замене сравнительного элемента магазином сопротивления такой же вид, как и приведенные в разделе 2.3. Некоторые отличия (от зависимости снятой для этой же термогруппы с компенсационным элементом) в области высоких концентраций метана (см. рис. 2.11) объясняются большим снижением температуры рабочего элемента вследствие охлаждающего действия метана, обусловленным заменой сравнительного элемента постоянным сопротивлением.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о том, что причиной провалов характеристики $U_{вых}=f(C)$ испытываемых датчиков не связан с окислением метана на компенсационном элементе, а, по всей видимости, объясняется нарушением термокаталитической реакции окисления метана на активном элементе в области взрывных концентраций метана. Второй возможной причиной этого провала могло бы быть протекание реакции окисления на некотором расстоянии от поверхности катализатора и снижение по этой причине количества тепла, расходуемого на нагрев рабочего элемента.

Для установления общности обнаруженного явления были проведены испытания термокаталитических датчиков изготавливаемых другими производителями, в частности Омским заводом «Электроточприбор» (Россия) и фирмы «Рикен Кейки» (Япония), а также предоставленный Одесской государственной академией пищевой технологии электрохимический датчик метана с применением платино-палладиевого катализатора.

Испытания показали, что установленное нами явление нарушения термокаталитической реакции окисления метана на каталитически активном элементе в области взрывных концентраций является характерным для всех термокаталитических датчиков и наблюдается при концентрации метана около 8,5

об.%. Очевидной причиной того, что явление не было установлено ранее является то, что оно проявляется в динамическом режиме при плавном изменении концентрации метана в метано-воздушной смеси и его практически нельзя было обнаружить при снятии зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ с использованием аттестованных газовых смесей. Однако по характеру кривой (см. рис. 2.4) полученной специалистами фирмы «Рикен Кейки» можно было также предположить наличие каких то аномальных явлений в диапазоне концентраций около 8 - 9 об.%.

Выходная характеристика электрохимического датчик метана приведена на рис.2.26, из которого видно, что при изменении концентрации метана от 0 до 15 об.% при концентрации метана около 9 об.% также наблюдается скачкообразное изменение выходной характеристики, что позволяет предполагать наличие срыва реакции окисления горючих газов в области взрывных концентраций и в данном типе датчика.

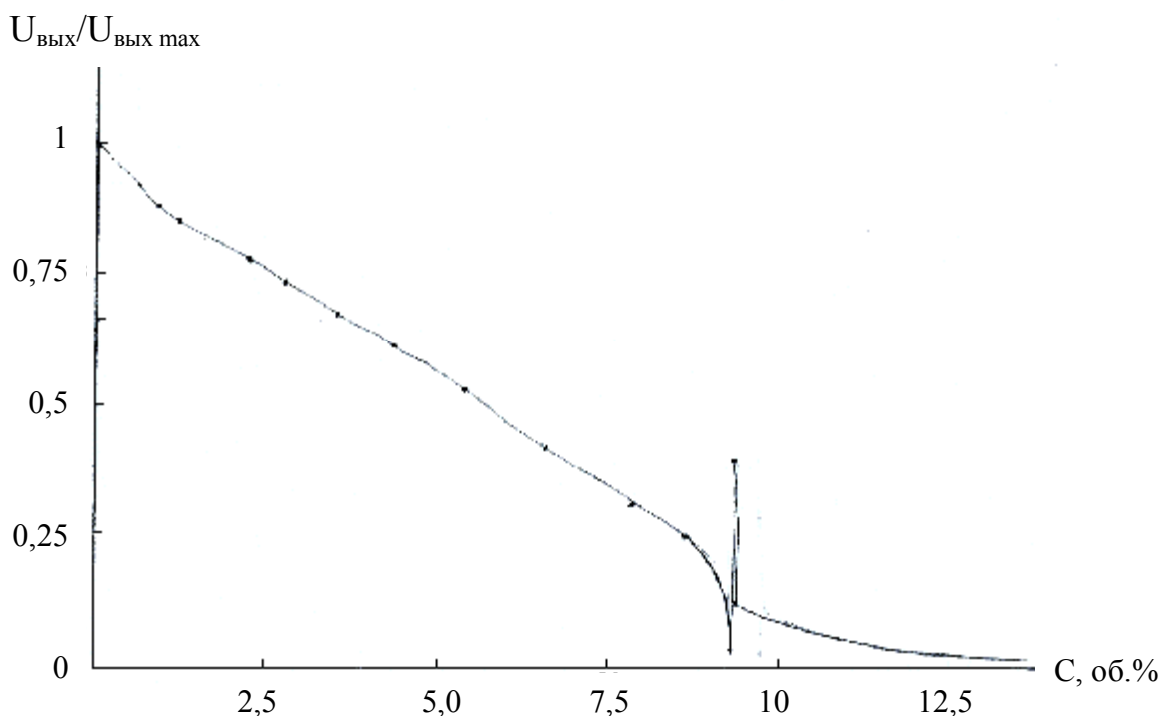


Рис. 2.26. Экспериментальная зависимость выходного сигнала электрохимической ячейки от концентрации метана

Возникновение этого явления можно объяснить изменением характера протекания процесса окисления метана на поверхности катализатора при переходе от избытка кислорода к избытку метана в смеси и возможно при равновесном потоке кислорода и метана к рабочему элементу, когда на активной поверхности катализатора образуется нулевая концентрация метана и кислорода.

Для определения плотности потока метана к поверхности элемента воспользуемся представлением о существовании диффузионного пограничного слоя, через который происходит перенос газа [30], согласно которого плотность потока метана q_m и кислорода q_{O_2} определяются как

$$q_m = D_m \Delta C_m / \delta_D, \quad (2.32)$$

$$q_k = D_k \Delta C_k / \delta_D, \quad (2.33)$$

где D_m, D_k - соответственно, коэффициент молекулярной диффузии метана в воздухе, $\text{м}^2/\text{с}$;

$\Delta C_m, \Delta C_k$ - соответственно, разность концентрации метана и кислорода между поверхностью элемента и внешней границей пограничного слоя;

δ_D - толщина диффузионного пограничного слоя, м.

С учетом того, что на окисление одной молекулы метана расходуется две молекулы кислорода, условие возникновения нулевой концентрации на поверхности катализатора можно записать в виде

$$D_m C_m / \delta_D = 0,5 D_k C_k / \delta_D. \quad (2.34)$$

В таком случае, с учетом выражения (2.10), нарушение реакции окисления метана может наступить при концентрации метана

$$C_m = 0,105 D_k / (D_m + 0,105 D_k) \quad (2.35)$$

При постоянном давлении коэффициенты диффузии газа в воздухе определяются по формуле Сатерленда

$$D = D_0 (T_m / T_0)^m, \quad (2.36)$$

где D_0 - коэффициент молекулярной диффузии газа в воздухе при 0°C , $\text{м}^2/\text{с}$;

m - температурный коэффициент (для кислорода $m = 1,724$; для метана $m = 1,747$).

С учетом того, что коэффициент молекулярной диффузии метана несколько больше чем кислорода (см. табл. 1.1) явление нарушения катализа в датчике должно наступать при концентрации метана ниже 9,5 об.%.

Расчетное значение концентрации метана, при котором выполняется равенство (2.35) в зависимости от температуры газа приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

Расчетное значение концентрации метана, при котором возникают условия для срыва реакции окисления

Температура газа, $^\circ\text{C}$	0	100	200	300	400	500	600
Концентрация метана, об.%	8,71	8,67	8,63	8,59	8,55	8,51	8,47

При температуре предварительного разогрева рабочего элемента 400°C , температуре окружающей среды 20°C , с учетом дополнительного разогрева от сжигания метана на $180 - 200^\circ\text{C}$ среднюю температуру газа в пограничном слое можно принять около 300°C . В таком случае срыв реакции окисления будет наступать при концентрации около 8,6 об.%, что соответствует результатам проведенных экспериментов.

Характерно то, что при более низкой температуре разогрева рабочего элемента точка равновесия несколько смещается в область более высоких концентраций метана. Это объясняет неустойчивость рассматриваемого явления,

так как после срыва реакции окисления температура рабочего элемента значительно снижается и при этом нарушается условия равновесия.

С таблицы видно, что срыв реакции окисления горючих газов в области взрывных концентраций для электрохимического датчика метана с применением платино-палладиевого катализатора, предоставленного Одесской государственной академией пищевой технологии, который работает без предварительного разогрева должен происходить при несколько большей концентрации метана чем в термокаталитических датчиках (около 8,7 об.%), что также подтверждается экспериментально.

Для выяснения причины провала выходной характеристики в области взрывных концентраций (нарушение термокаталитической реакции окисления метана на активном элементе или снижение количества тепла, расходуемого на нагрев рабочего элемента) было решено провести эксперимент, идея которого заключается в поддержании при помощи синтезатора газовых смесей концентрации метана вблизи точки провала характеристики и параллельном измерении концентрации газа метана в миниатюрной реакционной камере термокаталитическим и термокондуктометрическим датчиками. Если в момент провала выходной характеристики термокаталитического датчика концентрация метана в реакционной камере будет возрастать, то следует, что причиной провала является срыв каталитической реакции окисления. Наоборот, если в указанный момент концентрация метана в реакционной камере будет постоянной или снижаться, то следует, что реакции окисления протекает, а причиной провала является снижение количества тепла, расходуемого на нагрев рабочего элемента.

Учитывая неустойчивость и малую продолжительность процесса срыва, объем реакционной камеры должен быть по возможности минимальным, а реакционная камера должна быть отделена газодиффузионным фильтром от окружающей среды, сопротивление которого должно быть сопоставимо с газодиффузионным сопротивлением рабочего термоэлемента. Нами при экспериментальных исследованиях в качестве реакционной камеры использовалась серийная термогруппа с несколько увеличенным сопротивлением газодиффузионного фильтра (в три раза по сравнению с обычной величиной сопротивления). Рабочий элемент при этом использовался как чувствительный элемент термокаталитического датчика (условно, датчик низких концентраций), а в качестве чувствительного элемента термокондуктометрического датчика (условно, датчик высоких концентраций) использовался сравнительный элемент термогруппы. Схема включения элементов термогруппы приведена на рис. 2.27.

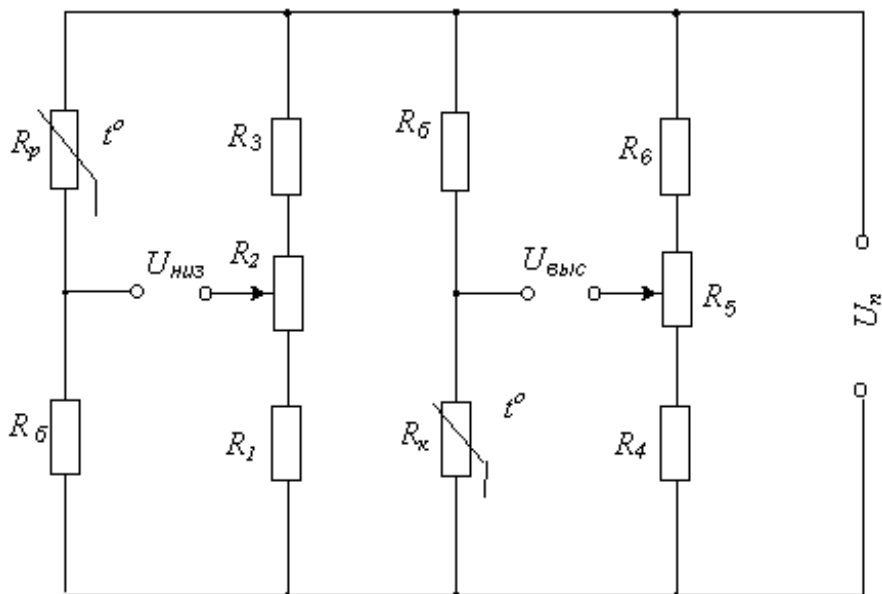


Рис. 2.27. Схема включения элементов термогруппы

В схеме, последовательно с термоэлементами включался постоянный резистор R_6 , величиной близкой к сопротивлению рабочего и сравнительного элемента при номинальном напряжении питания ($R_6 = 5$ Ом). Установка нуля мостовых измерительных схем осуществлялась при отсутствии метана переменными резисторами R_2 и R_5 .

Термогруппа устанавливалась в экспериментальную установку для проведения исследований (рис. 2.5) и при помощи синтезатора газовых смесей подбирались и поддерживалась концентрация метана вблизи точки провала характеристики термокаталитического датчика, так, чтобы наблюдались периодические срывы его показаний. Параллельно снимались значения выходных напряжений датчиков низких и высоких концентраций метана ($U_{низ}$ и $U_{выс}$). Наблюдения проводились для шести термогрупп при различных напряжениях питания термоэлементов. При некоторых отличиях в глубине и времени наблюдавшихся провалов выходной характеристики термокаталитического датчика, качественная картина процесса оставалась неизменной.

В табл. 2.3 приведен фрагмент из результатов наблюдений за работой первой исследованной термогруппы при номинальном режиме питания термоэлементов и варьировании концентрации на выходе синтезатора газовых смесей в диапазоне 8 – 9 об. %.

Таблица 2.3.

Значение выходных сигналов по датчикам высоких и низких концентраций метана при эксперименте

$U_{низ}, мВ$	47,2	-2,9	9,9	50,2	5,0	90,7	-2,8	15,3	60,0	6,2	90,8
$U_{выс}, мВ$	4,3	8,4	7,9	5,1	7,9	3,9	8,2	7,4	5,1	7,5	3,8

Динамика изменения показаний датчиков, приведенных к максимальным значениям выходных напряжений, приведена на рис. 2.28.

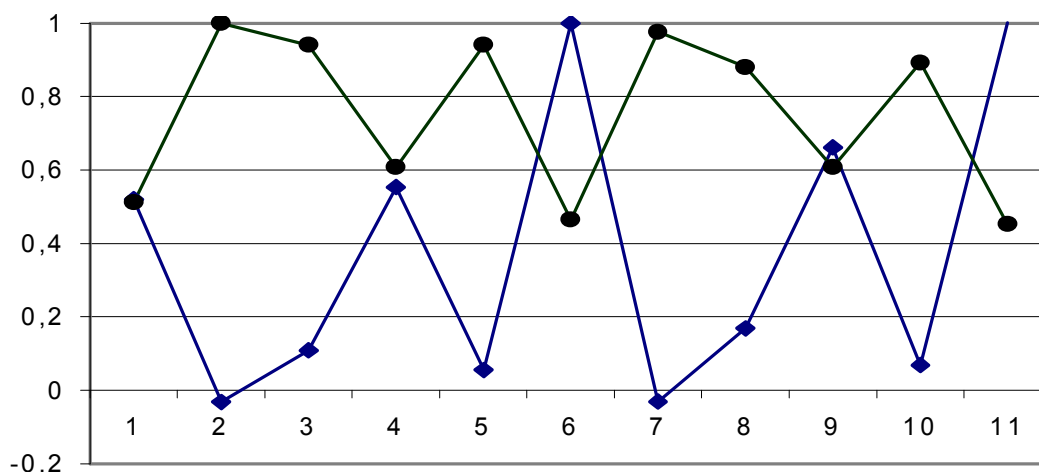


Рис. 2.28. Относительные изменения выходных сигналов по датчикам высоких и низких концентраций при эксперименте: \blacklozenge - $U_{низ}$; \bullet - $U_{выс}$.

Из табл. 2.3 и рис. 2.28 отчетливо видно, что в моменты провала выходного напряжения термокаталитического датчика наблюдается рост показаний термокондуктометрического датчика, что свидетельствует о том, что причиной провалов однозначно является срыв реакции каталитического окисления метана.

Анализ полученных экспериментальных результатов указывает на то, что термокаталитические датчики метана могут иметь широкий спектр характеристик $U_{вых} = f(C)$ как по количественным оценкам, так и по их виду [76]. Это обуславливает трудности при создании, серийном выпуске и эксплуатации однозначных сигнализаторов метана, работающих по фиксированному алгоритму и схеме. В этом случае одним из решений задачи может быть отбор датчиков с определенным видом выходной характеристики, но это дорого и сложно осуществить практически, поскольку можно не получить положительного эффекта, т. к. не известны исследования по изменению количественных оценок и вида характеристик термокаталитических датчиков во времени и от влияющих факторов. Кроме того, неизбежные перегрузки по метану при отборе датчиков могут вывести их из строя. Следовательно, один из путей создания надежно работающего однозначного газоанализатора с фиксированным алгоритмом и схемой - разработка термокаталитического датчика с фиксированной выходной характеристикой для всей совокупности датчиков, приближающейся, например, к виду, приведенному на рис.1. В противном случае возможна ситуация, когда однозначный сигнализатор метана может стать неоднозначным при замене в нем датчика в процессе эксплуатации. Другим решением этой задачи может быть создание сигнализатора метана, который работал бы по алгоритму, позволяющему адаптировать прибор к конкретному датчику, или разработка новых простых методов измерения содержания метана в диапазоне от 0 до 100об.%

2.8. Исследование временной стабильности термокаталитических датчиков

С целью обеспечения надежности взрывозащиты горных выработок шахт, стационарные автоматические средства контроля метана, основанные на термокаталитическом методе, требуют периодического контроля чувствительности и проверки нулевых показаний. Опыт эксплуатации этих средств показывает, что, как правило, в процессе длительной эксплуатации наблюдается снижение чувствительности датчиков метана и уход нуля измерительного моста в область положительных значений. Для выяснения причин этих изменений нами проведены исследования временной стабильности термокаталитических датчиков метана. Учитывая то, что в лабораторных условиях трудно обеспечить проведение наблюдений за работой датчиков в течение длительного периода в условиях приближенных к условиям эксплуатации на горных предприятиях, исследования временной стабильности были выполнены путем наблюдения за изменением характеристик термокаталитических датчиков при их работе в шахтных условиях. Для проведения исследований были отобрана партия из 10 термогрупп. Методика проведения исследований предусматривала:

- снятие вольтамперных характеристик всех термоэлементов датчиков;
- определение чувствительности датчиков, мВ/об.% CH_4 в области дозрывных концентраций;
- определение сопротивлений термоэлементов R_0 , а также сопротивлений балластных резисторов измерительного моста при установке нулевых показаний;
- установку отобранной партии термогрупп в анализаторы метана, и эксплуатацию их в шахте в течение 1 года;
- снятие, перечисленных выше характеристик и параметров датчиков после эксплуатации в течение указанного срока и сопоставление их с начальными значениями;
- визуальный осмотр датчиков.

Исследования показали, что количественные изменения параметров и характеристик датчиков в процессе эксплуатации отличаются, однако их качественный характер для всех датчиков одинаков. Он заключается в некотором снижении чувствительности датчиков в области дозрывных концентраций, смещением нуля в область положительных значений при включении в измерительный мост с прежней величиной сопротивлений балластных резисторов, незначительным увеличением сопротивления термоэлементов, некоторым изменением температуры начального разогрева термоэлементов в воздухе. Изменение вольтамперной характеристики сравнительного элемента более существенно, чем чувствительного элемента.

В таблице 2.4 приведены данные для одной из исследованных термогрупп, с наиболее отчетливо выраженными изменениями параметров после эксплуатации в течение года в шахтных условиях (исходящая из очистной выработки).

Таблица 2.4

Значение параметров термогруппы №3247 до и после эксплуатации в шахтных условиях в течение года

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение параметров до испытания		Значение параметров после испытания	
		рабочий	сравнит.	рабочий	сравнит.
R_{30}	Ом	1,884	1,882	1,887	1,884
U_s	мВ	898	902	908	892
I_s	мА	183	183	184	184
t_s	°С	401,1	404,7	403,8	393,3
$U_{ТГ}$	мВ	1800		1800	
Чувствительность	мВ/об.%	23,4		21,2	
Уход нуля	мВ	-		+10,2	

Наиболее вероятными причинами снижения чувствительности термогрупп в процессе эксплуатации являются снижение диффузионной проводимости металлокерамического газодиффузионного фильтра или снижение каталитической активности рабочего термоэлемента. Для выяснения роли этих причин, с термогрупп были сняты металлокерамические газодиффузионные фильтры, которые затем подверглись тщательной очистке (путем промывки органическими растворителями, продувки сжатым воздухом и сушки). Очищенные газодиффузионные фильтры были установлены на соответствующие термогруппы и определена чувствительность датчиков в области дозрывных концентраций после очистки фильтров. При этом было установлено, что чувствительность большей части термогрупп восстанавливается практически до первоначального значения. Причем для всех этих термогрупп характерным было некоторое снижение чувствительности по сравнению с первоначальной ее величиной, которое составляло 0,2 – 0,4 мВ/об.%. В отдельных случаях наоборот, наблюдалось незначительное повышение чувствительности, причиной которого, по видимому, являлись повреждения целостности газодиффузионных фильтров при их снятии с термогрупп и очистке. Это позволяет сделать вывод, что термогруппы в процессе длительной эксплуатации практически не потеряли свою каталитическую активность, а основной причиной снижения их чувствительности является загрязнение в процессе эксплуатации металлокерамического фильтра и связанное с этим снижение его диффузионной проводимости.

Визуальный осмотр термоэлементов датчиков показал, что сравнительные элементы всех датчиков изменили свой цвет с белого на темно-серый. Изменение цвета сравнительного элемента влечет за собой изменение коэффициента черноты его поверхности и приводит к росту радиационной составляющей теплообмена. Это объясняет причину снижения температуры начального разогрева компенсационных термоэлементов в воздухе после длительной эксплуатации и смещение нуля в область положительных значений.

Учитывая то, что следов пыли в реакционной камере не обнаружено, предположительной причиной изменения окраски является науглераживание

поверхности сравнительного термоэлемента в результате термической деструкции углеводородов. Справедливость этого предположения подтверждается тем, что при прокаливании термоэлемента (кратковременный разогрев до 600 – 700 °С путем пропускания через элемент повышенного значения тока) поверхность его приобретает начальную белизну без каких либо следов окраски.

Следует отметить, что при включении термогрупп в измерительный мост с прежней величиной сопротивлений балластных резисторов после прокаливания сравнительного элемента смещение нуля в область положительных значений практически устраняется. В целом, значения параметров термогрупп после очистки газодиффузионных фильтров и прокаливания сравнительного элемента становятся близкими к исходным (см. табл. 2.5).

Таблица 2.5

Значение параметров термогруппы №3247 до эксплуатации и после восстановления в лабораторных условиях

Наименование параметра	Единицы измерения	Значение параметров до испытания		Значение параметров после восстановления	
		рабочий	сравнит.	рабочий	сравнит.
$R_{\text{э0}}$	Ом	1,884	1,882	1,887	1,884
$U_{\text{э}}$	мВ	898	902	899	901
$I_{\text{э}}$	мА	183	183	183	183
$t_{\text{э}}$	°С	401,1	404,7	400,8	403,3
U_{IT}	мВ	1800		1800	
Чувствительность	мВ/об.%	23,4		23,1	
Уход нуля	мВ	-		+1,2	

Таким образом, выполненные исследования показали, что основной причиной снижения чувствительности термокаталитических датчиков является снижение диффузионной проводимости металлокерамического фильтра, а нестабильность нулевых показаний в значительной мере обусловлена изменением коэффициента черноты поверхности сравнительного термоэлемента. Начальные параметры термогруппы могут быть практически восстановлены путем ее разборки, очистки газодиффузионного фильтра и прокаливанием сравнительного термоэлемента, однако в промышленных условиях такое восстановление трудноосуществимо и может привести к повреждению датчиков.

Выводы

На основании выполненных исследований термокаталитических датчиков, изложенных во второй главе, можно сделать следующие выводы:

1. Существующие термокаталитические средства контроля метана не обеспечивают однозначности определения содержания метана в диапазоне изменения концентрации метана от 0 до 100 об.%.

2. В области концентраций от 0 до 10 об.% зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$ для всех исследуемых термогрупп характеризуется:

- практически линейным ростом выходного сигнала с увеличением концентрации метана до 6 об.%;

- наличием резкого уменьшения выходного сигнала (провал выходной характеристики) в области взрывных концентраций метана.

3. Провал в характеристике $U_{\text{вых}}=f(C)$ в области взрывоопасных концентраций обуславливает неоднозначность показаний сигнализации и защитного отключения, которая представляет значительную опасность, т.к. в этом случае возможно включение оборудования защищаемого участка или проведение запрещенных по газовому фактору работ при контроле содержания метана стационарными или переносными датчиками. Это может привести к катастрофическим последствиям. Вероятность их возникновения возрастает при пульсирующем газовыделении.

4. В области концентраций метана (от 10 до 100 об.%) до 60% средств контроля метана, в которых используются термогруппы с инверсией выходного сигнала при $C=100$ об.%, однозначность срабатывания защиты не обеспечивается.

5. Вид нисходящей зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ в области высоких концентраций метана для основного числа исследованных термогрупп близкий к линейному. Однако у термогрупп, характеризующихся пониженной температурой первоначального разогрева рабочего элемента (до 10%), в области концентраций метана от 60 до 80 об.% наблюдается существенное увеличение крутизны характеристики с последующим ее выполаживанием, что обуславливается переходом каталитической реакции окисления с диффузионной в кинетическую область.

6. При уменьшении концентрации метана от 100 до 0 об.% зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ для термогрупп по форме в значительной мере повторяют зависимости при увеличении концентрации метана, но с некоторым смещением $U_{\text{вых}}$ в область меньших его значений, что обуславливает наличие гистерезиса показаний, величина которого существенна для термогрупп, характеризующихся пониженной температурой первоначального разогрева рабочего элемента. В этом случае неоднозначность работы сигнализаторов метана может носить длительный характер, что опасно для жизни персонала, в том числе выходящего из зоны загазирования в изолирующих самоспасателях.

7. Вольтамперные характеристики термоэлементов серийных термогрупп, подобранных из условия равенства напряжения на элементах при номинальном режиме питания, являются неидентичными, что обуславливает смещение нулевых показаний при изменении параметров среды или источника питания и инверсию выходного напряжения термогруппы при больших концентрациях метана.

8. При эксплуатации в шахтных условиях основной причиной снижения чувствительности термокаталитических датчиков является снижение диффузионной проводимости металлокерамического фильтра. Нестабильность нулевых показаний при этом в значительной мере обусловлена изменением коэффици-

ента черноты поверхности сравнительного термоэлемента в результате науглероживания его поверхности продуктами термической деструкции углеводородов. Начальные параметры термогрупп могут быть практически восстановлены путем ее разборки, очистки газодиффузионного фильтра и прокаливанием сравнительного термоэлемента, однако в промышленных условиях такое восстановление трудноосуществимо и может привести к повреждению датчиков.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ МЕТАНА В АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЯХ

3.1. Экспериментальные исследования термokatалитических датчиков метана после их длительной работы в шахтных условиях

Нарушения работоспособности средств контроля содержания метана, возникающие в процессе их эксплуатации, в основном, связывают с изменением чувствительности термогруппы, обусловленной изменением температуры элементов, их старением, отравлением катализатора, снижением диффузионной проводимости газообменного фильтра, уходом нуля измерительного моста газоанализатора, а также неоднозначностью работы термokatалитических датчиков в области высоких концентраций метана. Предложенные решения по конструктивному исполнению датчика метана, введению дополнительного газодиффузионного сопротивления, термической балансировки термогруппы и др. позволили существенно снизить влияние перечисленных факторов на результаты измерения [29,68]. В значительной мере решены также вопросы обеспечения однозначности работы термokatалитических датчиков в области высоких концентраций метана. В частности установлены причины провалов выходной характеристики анализаторов метана в области взрывных концентраций метана, инверсии выходного сигнала при высоких концентрациях метана, гистерезиса показаний и предложены решения по исключению их влияния на работу средств автоматической газовой защиты [29]. Все это позволило освоить выпуск анализаторов метана с однозначностью показаний.

С позиции проведенных исследований необъяснимо, почему при работе термokatалитических анализаторов метана с однозначностью показаний наблюдаются случаи нарушения работоспособности при высоких концентрациях метана, возникающие, в частности, при аварийных загазованиях выработок шахт. Очевидно, что причины таких нарушений могут быть связаны или с изменением параметров и свойств чувствительных элементов термогруппы в процессе эксплуатации или с влиянием на работу термогруппы неучтенных газовых компонентов, в частности высших гомологов метана, водорода, угарного газа, которые в той или иной мере присутствуют в рудничной атмосфере при аварийных загазованиях.

Для выяснения причин нарушений работоспособности средств контроля содержания метана, возникающих в процессе их эксплуатации, нами проведены исследования изъятых из стационарных газоанализаторов термokatалитических датчиков метана, которые длительное время эксплуатировались в шахтных условиях (не менее 6 месяцев). Для проведения исследований были отобраны 10 термогрупп от анализаторов АТ1-1 и АТ3-1.

Методика проведения исследований предусматривала:

визуальный осмотр датчиков;

снятие зависимости выходного напряжения измерительного моста $U_{вых}$ от концентрации метана C в диапазоне от 0 до 100 и от 100 до 0 об.%;

снятие зависимости выходного напряжения измерительного моста $U_{вых}$ от концентрации смеси горючих газов (метан 95,9 об.%, этан 4,1 об.%) в диапазоне ее изменения от 0 до 100 и от 100 до 0 об.%;

очистка поверхности термоэлементов путем кратковременного их прокаливания;

снятие аналогичных зависимостей $U_{вых}=f(C)$ после очистки.

Снятие зависимостей $U_{вых}=f(C)$ проводилось на экспериментальной установке, описанной во второй главе, при температуре воздуха в помещении $25\pm 2^\circ\text{C}$ в следующей последовательности:

испытательная камера продувалась чистым атмосферным воздухом;

испытуемая термогруппа устанавливалась в испытательную камеру и включалась в мостовую измерительную схему, к выходу которой подключался милливольтметр;

на мостовую измерительную схему от блока питания подавалось стабилизированное напряжение соответствующее номинальной величине напряжения питания термогруппы в стационарных анализаторах метана;

через 15 минут (после полного прогрева термогруппы и установления показаний) производилась балансировка мостовой измерительной схемы (устанавливалось выходное напряжение $U_{вых}=0$);

при помощи синтезатора газовых смесей создавалась концентрация метана 1 об.% и подавалась в испытательную камеру, причем расход подаваемой в камеру газовой смеси устанавливался таким, чтобы за время 5 мин объем газовой смеси, поданной в камеру на порядок превысил объем испытательной камеры;

через 5 мин после начала подачи газовой смеси с интервалом в 5 с производилось снятие 10 показаний с милливольтметра и определялось среднее значение $\bar{U}_{вых}$ при данной концентрации метана и максимальная относительная величина отклонения единичных измерений от среднего значения;

если максимальная относительная величина отклонения единичных измерений от среднего значения не превышала 5 об.% то в испытательную камеру подавалась новая газовая смесь, в противном случае осуществлялась дополнительная продувка камеры в течении 5 мин и производились повторные измерения;

в диапазоне концентраций метана от 0 до 10 об.% концентрация менялась с градацией 1 об.%, а в диапазоне от 10 до 100 об.% – 10 об.%;

после снятия показаний при концентрации 100 об.% производилось снижение концентрации с той же градацией вплоть до нулевой концентрации метана и соответствующее снятие показаний.

Визуальный осмотр датчиков показал, что у всех датчиков после длительной эксплуатации изменилась окраска термоэлементов. Причем у каталитически активного элемента несколько снижается насыщенность черного цвета, а окраска сравнительного элемента с белого цвета меняется от желтовато-серой окраски до различных оттенков серого цвета. Это свидетельствует о накопле-

нии на поверхности термоэлементов продуктов термической деструкции углеводородов.

У семи из десяти испытуемых датчиков характер зависимости $U_{вых}$ от концентрации метана C в диапазоне от 0 до 100 и от 100 до 0 об.% не отличался от зависимостей полученных для новых датчиков, приведенных во второй главе. У остальных трех датчиков при увеличении концентрации метана в камере в области 30 - 50 об.% наблюдалось резкое снижение выходного сигнала (рис. 3.1) вплоть до его инверсии (рис. 3.2), которое продолжается практически до 100 об.% При обратном ходе от 100 до 0 об.% снижение выходного сигнала наблюдалось вплоть до 15 – 20 об.% Расчет значения температуры элементов, выполненный исходя из измеренных величин тока через элементы и падения напряжения на них [30], показал, что в момент провала резко возрастает температура сравнительного элемента датчика. Это свидетельствует о том, что постепенное накопление в процессе эксплуатации продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности сравнительного элемента приводит к увеличению его каталитической активности. При высокой концентрации метана (в данном случае в области 30-50 об.%) каталитическая реакция окисления метана на сравнительном элементе переходит с кинетической в диффузионную область. Это, в свою очередь, вызывает дополнительный разогрев сравнительного элемента, резкое снижение выходного сигнала измерительного моста и сбои в работе средств контроля.

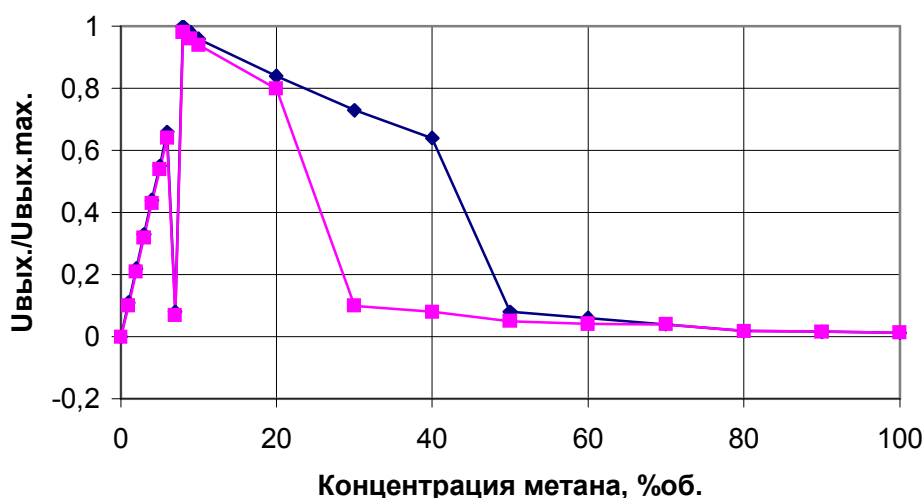


Рис. 3.1. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы №8 при изменении концентрации метана: \blacklozenge - от 0 до 100 об.%; \bullet - от 100 до 0 об.%

Следует отметить, что после активации сравнительного элемента каталитическая реакция окисления метана на нем протекает весьма интенсивно и, как видно по характеру приведенных на рис. 3.2 кривых, дополнительный разогрев сравнительного элемента может быть даже больше чем у рабочего элемента.

Возможная область значения концентраций, в пределах которой возможны сбои в работе средств автоматической газовой защиты из-за неоднозначности работы средств контроля, распространяется от 20 до 100 об.% метана, что

является весьма опасным явлением, так как может привести к ошибочному включению машин и механизмов на участке.

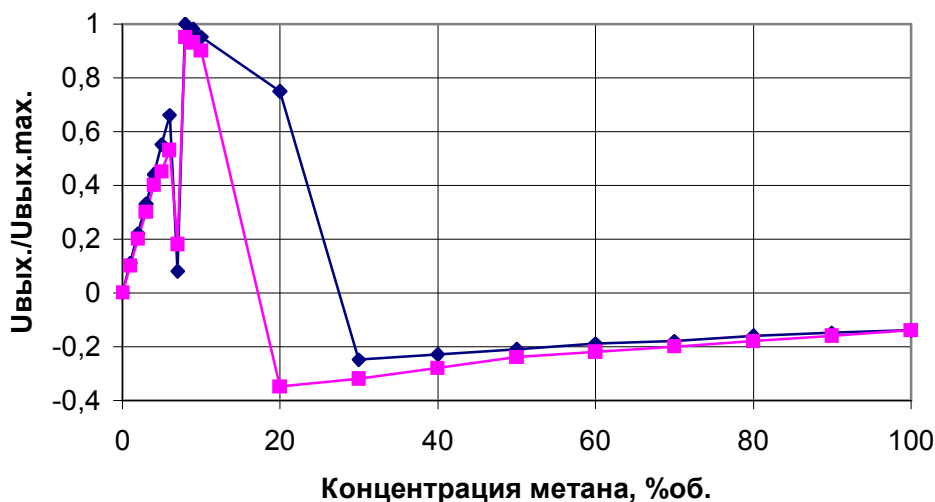


Рис. 3.2. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы №5 при изменении концентрации метана: \blacklozenge - от 0 до 100 об.%; \bullet - от 100 до 0 об.%

При исследовании зависимости выходного напряжения измерительного моста $U_{вых}$ от концентрации смеси горючих газов только у двух датчиков характер зависимости $U_{вых}$ от концентрации смеси в диапазоне от 0 до 100 и от 100 до 0 об.% не отличается от зависимостей полученных для новых датчиков, полученных при исследовании их на метане. У восьми датчиков аналогично предыдущему случаю наблюдается резкое снижение выходного сигнала вплоть до его инверсии: при прямом ходе - начиная с 30-40 об.%, а при обратном - затягивается до 10-20 об.% Очевидно, что наличие в смеси газов, характеризующихся более низкими температурами самовоспламенения, чем метан, приводит к их окислению на несколько активированном сравнительном элементе, способствует его дополнительному разогреву и переходу каталитической реакции окисления метана на сравнительном элементе с кинетической в диффузионную область. Об этом свидетельствует также то, что в области невысоких концентраций метана и смеси газов, когда лимитирующим агентом, определяющим величину выходного сигнала измерительного моста, является горючее, выходной сигнал у всех термокаталитических датчиков наблюдался примерно на 3-4% выше при подаче метана, чем при подаче аналогичной концентрации указанной смеси газов.

Проведенные ранее исследования показали, что значения параметров термогрупп после очистки газодиффузионных фильтров и прокаливания сравнительного элемента становятся близкими к исходным [69]. Для выяснения влияния прокаливания элементов на характер зависимости $U_{вых}=f(C)$, на следующем этапе исследований была произведена очистка поверхности термоэлементов от накопившихся за время эксплуатации продуктов термической деструкции углеводородов путем кратковременной подачи на термогруппу повы-

шенного напряжения. Визуальный осмотр датчика показал, что после прокаливания сравнительный элемент приобрел свою первоначальную окраску.

Последующие исследования датчиков после прокаливания показали, что у всех испытуемых датчиков характер зависимости $U_{вых}$ от концентрации метана C в диапазоне от 0 до 100 и от 100 до 0 об.% не отличается от зависимостей полученных для новых датчиков, приведенных во второй главе. Похожий характер зависимости был получен и при подаче в камеру смеси горючих газов. Это свидетельствует о том, что удаление продуктов термической деструкции углеводородов с поверхности сравнительного элемента при прокаливании снижает его каталитическую активность и поэтому горение метана на нем в области высоких концентраций практически не происходит.

В то же время в области невысоких концентраций метана и смеси газов, когда лимитирующим агентом, определяющим величину выходного сигнала измерительного моста, является горючее, выходной сигнал у всех термокаталитических датчиков, как и до прокаливания, был примерно на 3-4% выше при подаче метана, чем при подаче аналогичной концентрации указанной смеси газов. Это свидетельствует о том, что при выбранных температурных режимах работы термогруппы, газы, характеризующиеся более низкими температурами самовоспламенения чем метан, по прежнему окисляются на сравнительном элементе, что способствует его дополнительному разогреву и снижению выходного сигнала измерительного моста.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что постепенное накопление продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности сравнительного элемента, которое возникает в процессе эксплуатации газоанализаторов, приводит к увеличению его каталитической активности [69].

При высоких концентрациях метана, когда лимитирующим агентом в смеси становится кислород, в результате увеличения активности сравнительного элемента каталитическая реакция окисления метана на нем может переходить с кинетической в диффузионную область, что вызывает дополнительный разогрев сравнительного элемента и резкое снижение выходного сигнала измерительного моста, приводящее к нарушению работоспособности существующих термокаталитических газоанализаторов и отказу средств автоматической газовой защиты.

Наличие в рудничном газе высших гомологов метана и водорода способствует увеличению скорости каталитической реакции окисления метана на сравнительном элементе и увеличивает вероятность возникновения сбоев в работе газоанализаторов при аварийных загазировании шахт до высоких концентраций метана. Область значения концентраций, в пределах которой возможны нарушения в работе средств автоматического контроля метана из-за неоднозначности работы средств контроля, распространяется от 20 до 100 об.% метана.

Очистка поверхности термоэлементов от накопившихся за время эксплуатации продуктов термической деструкции углеводородов путем их кратковременного прокаливания позволяет снизить вероятность возникновения сбоев в работе газоанализаторов при аварийных загазировании шахт до высоких

концентраций метана. Однако температурные перенапряжения, возникающие при прокаливании термоэлементов, могут вызвать повреждения и способствуют их преждевременному износу.

В области невысоких концентраций метана, когда лимитирующим агентом, определяющим величину выходного сигнала измерительного моста, является горючее, высшие гомологи метана, водород и другие примеси, характеризующиеся более низкими температурами самовоспламенения чем метан и в заметном количестве содержащиеся в рудничном газе, в результате окисления на сравнительном элементе снижают выходной сигнал термokatалитических датчиков. Учитывая то, что нижний концентрационный предел взрывчатости смеси газов является ниже нижнего концентрационного предел взрывчатости метана, указанное явление понижает надежность срабатывания средств автоматической газовой защиты.

Для устранения сбоев в работе термokatалитических средств контроля метана, возникающих после их длительной эксплуатации в шахтных условиях, необходимо проведение исследований процессов накопления на поверхности термоэлементов продуктов термической деструкции углеводородов и изучить влияние высших гомологи метана, водорода и других горючих примесей на работу газоанализаторов метана.

3.2. Исследование процессов накопления продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов

Накопление продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов термokatалитических датчиков является нежелательным процессом, так как приводит к изменению их каталитической активности, а кроме того, приводит к изменению цветовой окраски сравнительного термоэлемента и условий теплообмена между элементами и окружающей средой, что влечет за собой смещение нуля газоанализаторов [69, 70]. Ввиду трудностей количественной оценки продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов до настоящего времени не установлено, что является основной причиной этого явления, как влияют тепловые режимы термоэлементов на скорость накопления продуктов деструкции и каким образом можно устранить или замедлить эти процессы.

Наличие продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов обычно оценивается визуально по изменению цветовой окраски термоэлементов. Относительная количественная оценка наличия продуктов деструкции в этом может быть получена путем измерения и сопоставления значений коэффициентов отражения поверхностей. Однако, ввиду малых размеров элементов, изменчивости формы и структуры поверхности измерение коэффициентов отражения поверхностей является достаточно сложной задачей, а кроме того для такой оценки необходимо произвести отделение газодиффузионного фильтра от основания датчика, что нарушает его целостность и может привести к изменению характеристик датчика.

При кратковременном разогреве сравнительного термоэлемента до температуры выше 600°C путем пропускания через элемент повышенного значения тока наблюдается яркая кратковременная вспышка, обусловленная сгоранием накопившегося углерода, и поверхность элемента приобретает начальную белизну без видимых следов окраски. Вспышка длится доли секунды и приводит к кратковременному дополнительному разогреву термоэлемента. При отсутствии на поверхности термоэлементов продуктов термической деструкции углеводородов, указанные вспышки не наблюдаются. На рис. 3.3 приведены осциллограмма тока и напряжения на термоэлементах при наличии и отсутствии на их поверхности продуктов термической деструкции углеводородов. Дополнительный разогрев термоэлемента, вызванный сгоранием продуктов деструкции, приводит к появлению импульса напряжения длительностью до 1 с и достаточно четко идентифицируется по амплитуде или площади этого импульса. Учитывая это, нами предложено осуществлять относительную количественную оценку наличия продуктов термической деструкции по амплитуде импульса, наблюдаемого при прокаливании термоэлемента. Такая оценка не требует применения сложной измерительной аппаратуры и осуществляется без нарушения целостности термогруппы.

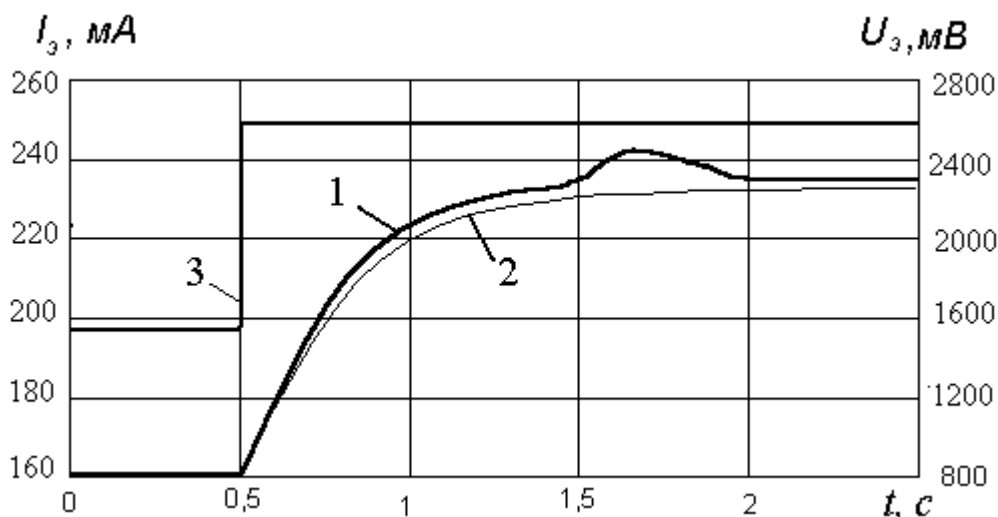


Рис. 3.3. Изменение напряжения на компенсационном элементе при наличии (1) и отсутствии продуктов термической деструкции углеводородов (2) и скачкообразном изменении тока I_{mz} (3).

Относительная количественная оценка наличия продуктов термической деструкции углеводородов может быть осуществлена в следующей последовательности:

- снимается кривая изменения напряжения на испытуемом термоэлементе при скачкообразном изменении тока;
- повторно снимается аналогичная кривая после удаления продуктов деструкции или на участке, где наблюдается всплеск напряжения, реальная кривая заменяется плавной линией без перегибов, аналогичной кривой 2, приведенной на рис. 3.3;

- определяется максимальная величина разности напряжения кривых в месте всплеска, а затем рассчитывается нормированное значение всплеска напряжения

$$\Delta = \frac{\Delta U_{\max}}{U_0}, \quad (3.1)$$

где ΔU_{\max} - максимальная величина разности напряжения кривых в месте всплеска, мВ; U_0 - установившееся значение напряжения на элементе после прокаливания, мВ.

Полученное нормированное значение всплеска напряжения является в данном случае показателем карбонизации элементов, который характеризует количество продуктов термической деструкции углеводородов, накопленных на элементе.

Целью исследований процессов карбонизации термоэлементов являлось установление влияния на скорость накопления продуктов термической деструкции углеводородов температурных режимов элементов и состава анализируемой среды, в том числе концентрации метана и его высших гомологов.

Особенность исследуемых процессов заключается в том, что накопление продуктов термической деструкции углеводородов протекает весьма медленно. Для получения достоверных результатов необходимо чтобы датчик анализатора непрерывно проработал в загазированной среде в течении 1-3 месяцев и более. При использовании для проведения таких длительных исследований установки с синтезатором газовых смесей, которая описана в [29], требуется весьма большой объем газовых смесей. Это обусловлено тем, что минимальный расход смеси, при котором обеспечивается надежная работа синтезатора, составляет 0,063 м³/час. При таком расходе объем газовой смеси, необходимый для проведения исследований на протяжении трех месяцев составляет 136 м³.

При установке испытуемого датчика в герметичной камере без продувки, в результате окисления метана на поверхности активного элемента концентрация метана и кислорода в камере будут по мере испытаний снижаться. В работе [72] выполнены исследования процесса выгорания метана в герметичной камере при неограниченном доступе метана до термоэлемента (при отсутствии металлокерамического фильтра). Изменение концентрации метана в камере C_{mk} в этом случае описывается выражением

$$C_{mk} = C_{mko} \exp\left(-\frac{\gamma_3 t}{V_k}\right), \quad (3.2)$$

где C_{mko} – начальная концентрация метана, об.%; V_k – объем камеры, м³.

Величина эффективной диффузионной проводимости термоэлемента при нормальных условиях эксплуатации, определенная экспериментальным путем по скорости выгорания метана, составляет $\gamma_3 = 0,88 \cdot 10^{-7}$ м³/с [72]. При таком значении γ_3 концентрация метана в герметичной камере объемом 0,1 м³ уменьшится в два раза за 9 суток.

При наличии газодиффузионного фильтра поток метана, окисляющегося на чувствительном элементе, определяется суммарным газодиффузионным со-

противлением фильтра и элемента. Эффективная диффузионная проводимость термоэлемента и диффузионная проводимость фильтра обычно являются сопоставимыми по величине. Их суммарная проводимость составляет

$$\tau = \frac{\gamma_s \gamma_\phi}{\gamma_s + \gamma_\phi}, \quad (3.3)$$

где γ_ϕ – проводимость газодиффузионного фильтра, м³/с.

С учетом (3.3) концентрация метана в герметичной камере указанного объема снизится в два раза за 15-25 суток. Поэтому, для того, чтобы обеспечить постоянные условия при эксперименте надо или использовать газовую камеру значительно большего объема, или постоянно добавлять в камеру новую смесь с расходом порядка 10-15 литров в сутки.

Учитывая изложенное, экспериментальные исследования процессов карбонизации термоэлементов осуществлялось в условиях ОАО “Красный металлист” на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис.3.1. Ее отличие от установки, описанной в [29], заключается в наличии эластичной газонепроницаемой камеры с постоянным нагружением (кислородная подушка) и двух капилляров. Капилляр 8 служит для ограничения скорости подачи смеси в камеру. Его сопротивление выбрано таким, чтобы расход газовой смеси составлял около 10 литров в сутки в расчете на один испытываемый датчик. Капилляр 12 предназначен для предотвращения попадания в камеру воздуха. Его сопротивление выбрано на порядок меньше сопротивления капилляра 8, что практически обеспечивает равенство давления в камере и в окружающей среде.

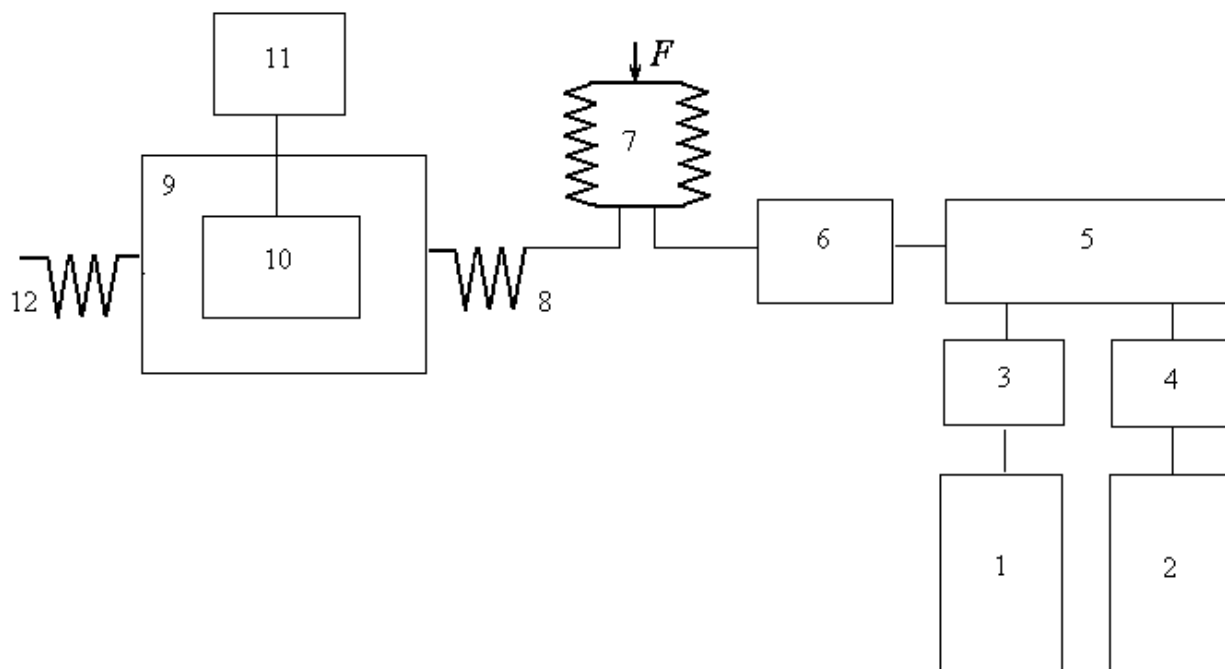


Рис. 3.1. Схема установки для проведения исследований:

1,2 - баллоны с воздухом и газовыми смесями; 3,4 – редукторы; 5 – синтезатор газовых смесей; 6 – ротаметр; 7 – эластичная газонепроницаемая камера с постоянным нагружением; 8, 12 – капилляры; 9 – газовая камера; 10 – исследуемый датчик; 11 – первичный преобразователь измерительный (ППИ).

Газовая часть установки включает синтезатор газовых смесей, баллоны с редукторами для метана и воздуха, ротаметр, эластичную газонепроницаемую камеру с постоянным нагружением, капилляры и газовую испытательную камеру. Наличие синтезатора газовых смесей позволяет плавно регулировать концентрацию метана в метановоздушной смеси подаваемой периодически в эластичную газонепроницаемую камеру (по мере ее использования). С емкости смесь с небольшим расходом постоянно поступает к первичным преобразователям испытуемого газоанализатора. Диапазон синтезируемых концентраций от 0 до 100 об.% с погрешностью $\pm 0,2$ об.%

Электронная часть установки включает выносной датчик метана, установленный в газовой камере и измерительный преобразователь газоанализатора. Для измерения величины тока, протекающего через термоэлементы, последовательно в линию питающую датчик включался миллиамперметр.

Для проведения исследований использовались выносные датчики и ППИ от серийно выпускаемых ОАО “Красный металлист” стационарных анализаторов метана АТЗ-1 [73].

Исследования термогрупп производились при температуре воздуха в помещении $22\pm 2^\circ\text{C}$ в следующей последовательности:

газовая камера установки продувалась чистым атмосферным воздухом;

в газовую камеру устанавливались три выносных датчика метана от аппаратуры АТЗ-1 и подключались к ППИ, при этом в линию питания ППИ включались миллиамперметры;

ППИ подключались к аппарату сигнализации (АС) аппаратуры через переменные резисторы, имитирующие сопротивление линии связи;

изменяя сопротивление переменных резисторов, устанавливались значения токов через термоэлементы: первого датчика - 210 мА, второго - 195 мА, третьего - 180 мА, что обеспечивало, относительно нормального режима работы термогруппы в анализаторах метана, работу первого датчика с перегревом ($470-480^\circ\text{C}$), второго - в нормальном режиме разогрева ($400-410^\circ\text{C}$) и третьего - с недостаточным разогревом элементов ($350-360^\circ\text{C}$);

через 15 минут (после полного прогрева датчиков и установления показаний) производилась балансировка мостовой измерительной схемы (устанавливалось $U_{\text{вых}}=0$);

при помощи синтезатора газовых смесей создавалась концентрация метана 3 об.% и подавалась непосредственно в газовую камеру (минуя капилляр) с расходом $0,2$ м³/час;

после установления показаний анализаторов производилась корректировка их чувствительности (на цифровом табло ППИ устанавливались показания 3 об.% CH_4);

синтезатор газовых смесей подключался к эластичной камере, и производилось ее заполнение газовой смесью с концентрация метана 3 об.%;

эластичная камера подключалась через капилляр к газовой камере и с расходом около 30 л/сутки в газовую камеру поступала газовая смесь, при этом расход газа оценивался по изменению объема эластичной камеры;

периодически (два раза в неделю) эластичная камера пополнялась газовой смесью и считывались показания с ППИ;

по истечении трех месяцев подача газовой смеси прекращалась, газовая камера установки продувалась чистым атмосферным воздухом а затем смесью с концентрацией метана 3 об.% и, после окончания переходных процессов, определялся уход нуля мостовой измерительной схемы и изменение ее чувствительности;

выносные датчики отсоединялись от ППИ и, путем прокаливания термоэлементов, осуществлялась их очистка от продуктов термической деструкции углеводородов и количественная оценка этих продуктов по описанной ранее методике.

После окончания первого цикла исследований датчиков метана, они снова подключались к ППИ, устанавливались значения токов через термоэлементы, проверялся нуль и подстраивалась чувствительность по с 3 об.% метана, а затем синтезатором газовых смесей создавалась концентрация метана 40 об.% и эти же термогруппы, при тех же параметрах питания термоэлементов исследовались в области высоких концентраций метана.

Для исследования влияния на процессы накопления продуктов термической деструкции высших гомологов метана, синтезатором газовых смесей создавалась смесь: этан 2 об.% – воздух 98 об.% Учитывая то, что этан имеет температуру воспламенения почти на 200 °С ниже чем метан, и при предварительном нагреве термоэлементов до температуры 470-480 °С устойчиво горит не только на рабочем но и на сравнительном элементе, при испытаниях по этану значения токов через термоэлементы устанавливались ниже чем при испытаниях по метану. Их значения составляли: первого датчика - 195 мА, второго - 180 мА, третьего – 165 мА, что соответствовало работе первого датчика в анализаторах метана в нормальном режиме (400-410 °С), второго – с недостаточным разогревом элементов (350-360 °С), а третьего – в режиме, когда метан практически не окисляется на рабочем элементе (300-310 °С). Исследования выполнялись аналогично исследованиям при 3 об.% метана, при этом продувка, регулировка чувствительности и определение чувствительности после испытаний осуществлялись на смеси с содержанием 2 об.% этана.

В результате проведенных исследований было установлено, что при концентрации метана 3 об.% все анализаторы сохранили работоспособность и относительную стабильность показаний в течение всего времени испытаний. Значения параметров анализаторов при испытаниях на смеси с содержанием метана 3 об.% приведено в табл. 3.1.

Из табл. 3.1 видно, что при принятой подаче смеси в газовую камеру с расходом около 30 л/сутки за счет выгорания метана на чувствительных элементах датчиков его концентрация в камере составила 2,6 об.% Несколько более низкие показания третьего датчика объясняются тем, что при температуре начального разогрева термоэлементов ниже нормального режима каталитическая реакция окисления еще не полностью перешла с кинетической области в диффузионную. В то же время в кинетической области скорость реакции опре-

деляется произведением объемно-молярных концентраций метана и кислорода, то есть зависит не только от концентрации метана, а и концентрации кислорода в смеси [30]. Поскольку при выгорании метана в газовой камере одновременно снижается и концентрация кислорода, то это ведет к уменьшению скорости реакции на активном элементе третьего датчика и, по-видимому, является причиной его более низких показаний в сопоставлении с остальными.

Таблица 3.1

Результаты испытания датчиков при концентрации метана 3 об.%

№ датчика	Ток через термоэлементы, мА	Начальные показания, об.%	Конечные показания, об.%	Смещение нуля, об.%	Изменение чувствительности, об.%	Показатель карбонизации, Δ	
						чувствительного элемента	сравнительного элемента
1	210	2,6	3,2	+0,6	0,0	0,00	0,05
2	195	2,6	2,9	+0,4	-0,1	0,01	0,02
3	180	2,5	2,3	0,0	-0,2	0,06	0,00

К концу периода наблюдения показания первых двух датчиков возросли, а третьего датчика несколько снизились, что в первую очередь связано со смещением нуля и частично со снижением чувствительности. Характерно то, что у датчика, работающего с перегревом, чувствительность практически не изменилась, зато произошло наибольшее смещение нуля, а у датчика с низкой температурой предварительного нагрева элементов – наоборот, смещение нуля отсутствует, но наблюдается снижение чувствительности. Характер зависимости смещения нуля и изменения чувствительности от режимов работы термоэлементов представлен на рис. 3.2.

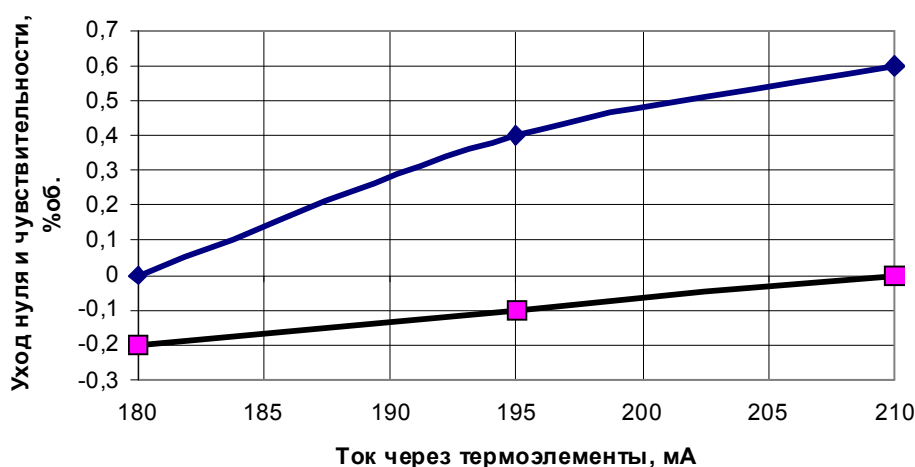


Рис. 3.2. Зависимость смещения нуля и изменения чувствительности от режимов работы термоэлементов после испытаний в смеси с 3 об. % метана:

■ - изменение чувствительности; ◆ - смещения нуля анализатора.

Показатель карбонизации рабочего и сравнительного термоэлементов неоднозначно зависят от их температурных режимов. По мере повышения температуры предварительного разогрева показатель карбонизации рабочего элемента уменьшается, а сравнительного - возрастает. Характер зависимости показателя карбонизации термоэлементов после испытаний от их режимов работы приведен на рис. 3.3.

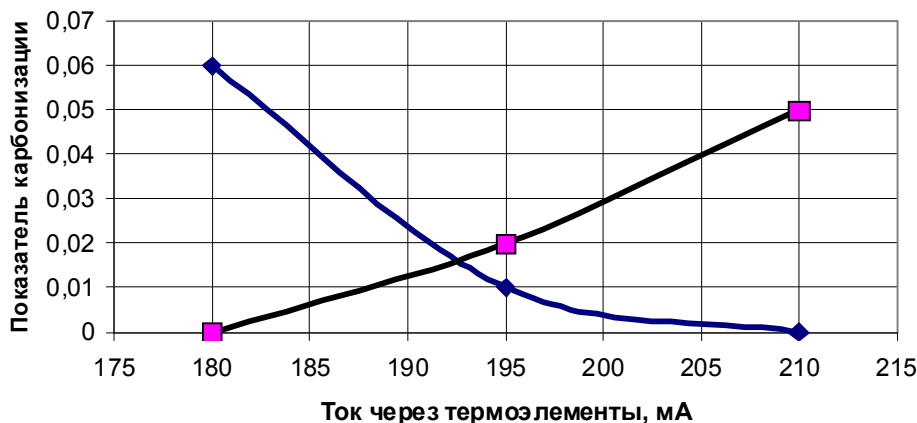


Рис. 3.3. Зависимость показателя карбонизации термоэлементов от их режимов работы после испытаний в смеси с 3 об.% метана: ■ - сравнительного элемента; ◆ - чувствительного элемента.

Из рис. 3.3 видно, что при работе термокаталитических датчиков в нормальных условиях (в области концентраций метана ниже недопустимых по ПБ) карбонизация чувствительного элемента практически исключается при токах через термоэлементы 200 мА и более, что соответствует температуре предварительного их разогрева более 410 °С. При таком режиме работы термогруппы практически неизменной сохраняется чувствительность термогруппы (рис. 3.2). При меньших токах через термоэлементы накопление продуктов термической деструкции углеводородов на рабочем элементе протекает более интенсивно, а это в свою очередь приводит к снижению его каталитической активности. Это позволяет сделать вывод, что процессы карбонизации чувствительного термоэлемента и снижения чувствительности термогруппы взаимосвязаны и для предотвращения этого явления следует выбирать температуру предварительного нагрева рабочего элемента более 410 °С.

В то же время при указанной температуре предварительного рабочего элемента наблюдается весьма существенное смещение нуля мостовой измерительной схемы (рис. 3.2), что, по-видимому, обусловлено высокой степенью карбонизации сравнительного элемента, поскольку она приводит к изменению коэффициента черноты поверхности, увеличению доли радиационного теплообмена в тепловом балансе сравнительного элемента и снижению его температуры, что в свою очередь приводит к смещению нуля моста в сторону положительных значений. В отличие от чувствительного элемента, при меньших токах через термогруппу накопление продуктов термической деструкции углеводородов на сравнительном элементе протекает менее интенсивно, а это в свою оче-

редь приводит к меньшему смещению нуля мостовой измерительной схемы. Таким образом, процессы карбонизации сравнительного термоэлемента и смещения нуля моста взаимосвязаны и для предотвращения этого явления следует выбирать температуру предварительного нагрева сравнительного элемента менее 350 °С.

Во второй серии экспериментов при концентрации метана 40 об.% все анализаторы сохранили работоспособность, однако только третий анализатор с низкой температурой предварительного разогрева сохранил относительную стабильность показаний в течение всего времени испытаний. Показания первого анализатора на 32 день испытаний начали резко снижаться, вплоть до нулевых показаний, а затем стабилизировались на уровне 0,7 об.% Измерение величины напряжений на термоэлементах показало, что напряжение и сравнительном элементе установилось выше чем на рабочем, то есть, произошла инверсия выходного сигнала измерительного моста. Аналогичное снижение показаний произошло на 86 день и у второго анализатора. Учитывая то, что все анализаторы сохранили после исследований в смеси с 40 об.% метана практически начальную чувствительность, резкое снижение показаний первого и второго анализаторов может быть связано только с возникновением устойчивого горения метана на сравнительном элементе со скоростью аналогичной скорости горения на рабочем элементе.

Значения параметров анализаторов при испытаниях на смеси с содержанием метана 40 об.% приведено в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты испытания датчиков при концентрации метана 40 об.%

№ датчика	Ток через термоэлементы, мА	Начальные показания, об. %	Конечные показания, об. %	Смещение нуля, об. %	Изменение чувствительности, об. %	Показатель карбонизации, Δ	
						чувствительного элемента	сравнительного элемента
1	210	4,7	-0,7	+0,8	0,0	0,00	0,13
2	195	4,8	-0,4	+0,7	-0,1	0,02	0,12
3	180	4,6	4,1	+0,1	-0,2	0,09	0,02

К концу периода наблюдения у датчика, работающего с перегревом, чувствительность практически не изменилась, зато произошло наибольшее смещение нуля, а у датчика с низкой температурой предварительного нагрева элементов – наоборот, смещение нуля было минимальное, но наблюдается снижение чувствительности. Характер зависимости смещения нуля и изменения чувствительности от режимов работы термоэлементов представлен на рис. 3.4.

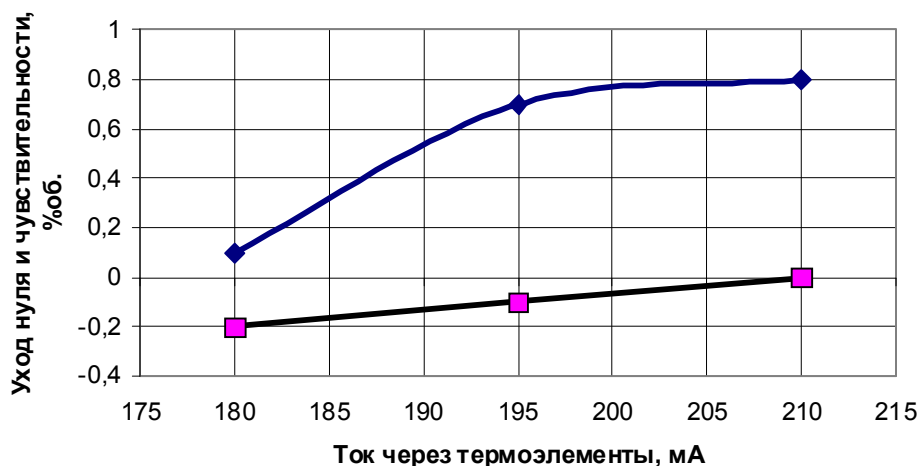


Рис. 3.4. Зависимость смещения нуля и изменения чувствительности от режимов работы термоэлементов после испытаний в смеси с 40 об.% метана: ■ - изменение чувствительности; ◆ - смещения нуля анализатора.

Показатель карбонизации рабочего и сравнительного термоэлементов в данном случае существенно больше, чем при работе датчиков в области дозрывных концентраций. Эти показатели также неоднозначно зависят от их температурных режимов. По мере повышения температуры предварительного разогрева показатель карбонизации рабочего элемента уменьшается, а сравнительного - возрастает. Характер зависимости показателя карбонизации термоэлементов после испытаний от их режимов работы приведен на рис. 3.5.

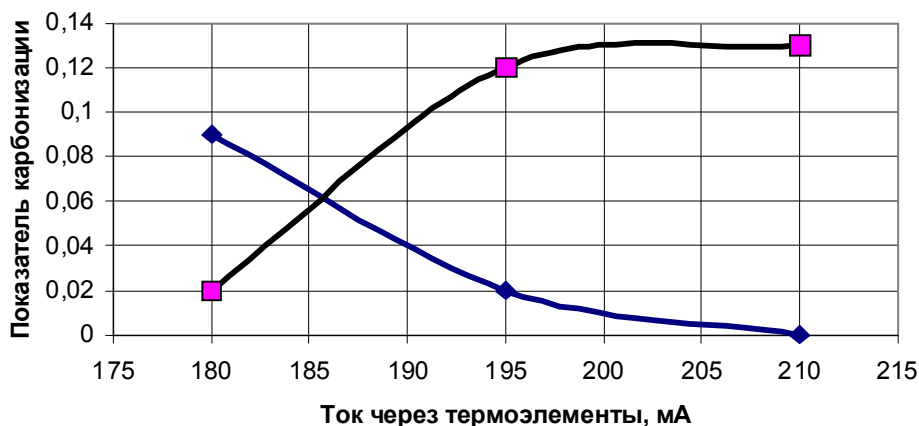


Рис. 3.5. Зависимость показателя карбонизации термоэлементов от их режимов работы после испытаний в смеси с 40 об.% метана: ■ - сравнительного элемента; ◆ - чувствительного элемента.

Из рис. 3.5 видно, что аналогично предыдущему случаю и при работе термокаталитических датчиков в смеси с 40 об.% метана карбонизация чувствительного элемента практически исключается при токах через термоэлементы 200 мА и более. В этом же режиме работы термогруппы практически неизменной сохраняется чувствительность термогруппы (рис. 3.4). При меньших токах

через термоэлементы накопление продуктов термической деструкции углеводородов на рабочем элементе протекает более интенсивно, чем при работе в области низких концентраций метана, что приводит к снижению его каталитической активности. Процессы карбонизации чувствительного термоэлемента и снижения чувствительности термогруппы взаимосвязаны и аналогично предыдущему случаю для предотвращения карбонизации этого элемента следует выбирать температуру его предварительного нагрева более 410 °С.

В отличие от предыдущего случая карбонизация сравнительного элемента в смеси с 40 об.% метана наблюдается уже при токе через элементы 180 мА, а уже при номинальном режиме работы термогруппы фактически достигает своего максимального значения и при дальнейшем росте тока меняется незначительно. Такой характер зависимости объясняется, по-видимому, тем, что в результате накопления продуктов термической деструкции углеводородов происходит активация сравнительного элемента, приводящая к возникновению устойчивого горения на нем метана. После активации сравнительного элемента процессы накопления продуктов термической деструкции углеводородов на нем существенно замедляются и протекают как на чувствительном элементе. Учитывая тот факт, что интенсивное горение метана на сравнительном элементе первого анализатора ($I_{m2} = 210$ мА) началось на 32 день испытаний, а показания второго анализатора ($I_{m2} = 195$ мА) начали резко снижаться на 86 день, можно предположить, что скорость накопления продуктов термической деструкции углеводородов на сравнительном элементе перегретой термогруппы была в 2,7 раза выше, чем у термогруппы работающей в номинальном режиме.

Смещение нуля мостовой измерительной схемы, наблюдаемое при указанных режимах питания термогруппы в смеси с 40 об.% метана (рис. 3.4), существенно больше, чем при работе датчиков в смеси с 3 об.% метана (рис. 3.2), что, обусловлено более высокой степенью карбонизации сравнительного элемента (рис. 3.5). В отличие от предыдущего случая накопление продуктов термической деструкции углеводородов на сравнительном элементе протекает и при низких температурах разогрева, хотя и не так активно, как при нормальной и повышенной температуре разогрева. Следовательно и при высокой концентрации метана процессы карбонизации сравнительного термоэлемента и смещения нуля моста взаимосвязаны. Однако в данном случае выбор температуры предварительного нагрева сравнительного элемента менее 350 °С не полностью исключает процесс карбонизации.

В третьей серии экспериментов при концентрации этана 2 об.% все анализаторы сохранили работоспособность, однако показания первого анализатора, который работал с наивысшей температурой предварительного нагрева элементов постепенно снижались, что очевидно было связано с активацией сравнительного элемента и возникновением устойчивого горения этана на нем при высокой температуре предварительного нагрева. Справедливость этого предположения подтверждается тем, что чувствительность этого датчика к смеси с 2 об.% этана полностью восстановилась после прокаливания сравнительного элемента и удаления с его поверхности продуктов термической деструкции углеводородов.

Значения параметров анализаторов при испытаниях на смеси с содержанием этана 2 об.% приведено в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты испытания датчиков при концентрации этана 2 об.%

№ датчика	Ток через термоэлементы, мА	Начальные показания, об.%	Конечные показания, об.%	Смещение нуля, об.%	Изменение чувствительности, об.%	Показатель карбонизации, Δ	
						чувствительного элемента	сравнительного элемента
1	195	1,7	1,5	+0,6	-0,8	0,00	0,11
2	180	1,7	1,9	+0,4	-0,1	0,01	0,05
3	165	1,6	1,4	+0,1	-0,2	0,03	0,01

Наибольшее смещение нуля произошло у датчика с наибольшей температурой предварительного разогрева элементов. У датчика с низкой температурой предварительного нагрева элементов, смещение нуля было минимальное, но наблюдается заметное снижение чувствительности. Характер зависимости смещения нуля и изменения чувствительности от режимов работы термоэлементов представлен на рис. 3.6.

Показатель карбонизации рабочего термоэлемента в данном случае существенно меньше, чем при работе датчиков в смеси с высокой концентрацией метана, а сравнительного элемента – сопоставимый с предыдущим случаем. По мере повышения температуры предварительного разогрева показатель карбонизации рабочего элемента уменьшается, а сравнительного - возрастает. Характер зависимости показателя карбонизации термоэлементов после испытаний от их режимов работы приведен на рис. 3.7.

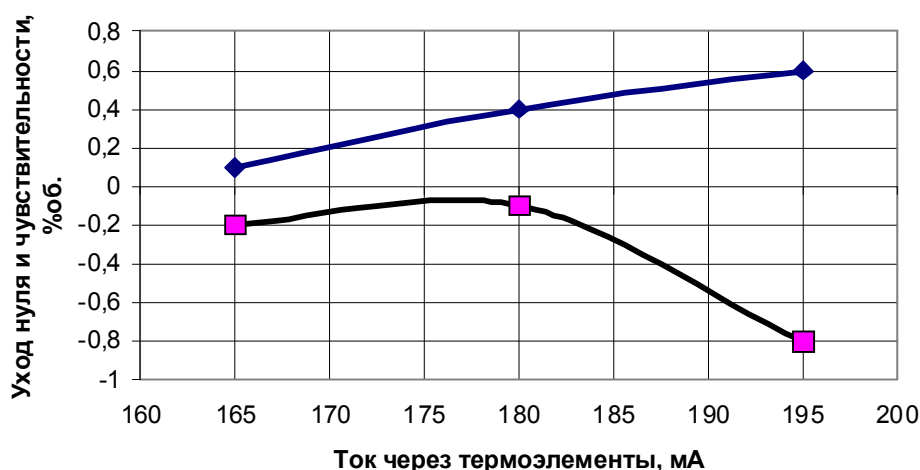


Рис. 3.6. Зависимость смещения нуля и изменения чувствительности от режимов работы термоэлементов после испытаний в смеси с 2 об.% этана:

■ - изменение чувствительности; ◆ - смещения нуля анализатора.

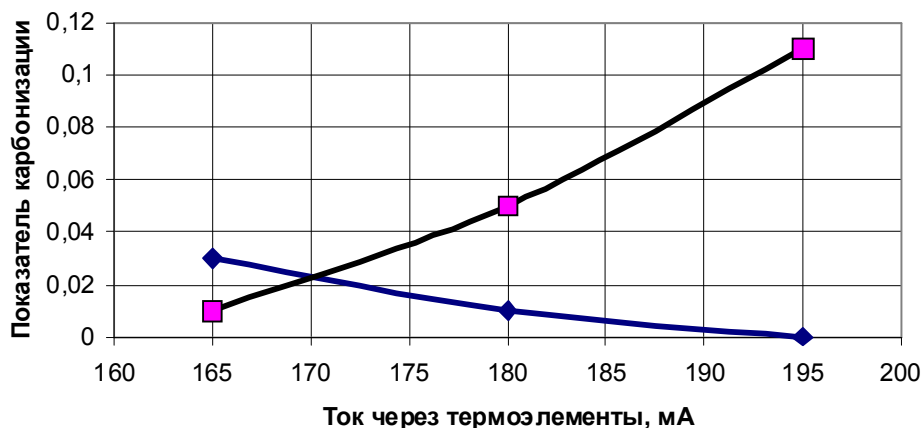


Рис. 3.7. Зависимость показателя карбонизации термоэлементов от их режимов работы после испытаний в смеси с 2 об.% этана: ■ - сравнительного элемента; ◆ - чувствительного элемента.

Последний цикл исследований показал, что в смеси 2 об.% этана при работе термokatалитических датчиков метана с номинальным режимом нагрева чувствительных элементов карбонизация чувствительного элемента не наблюдается. Карбонизация же сравнительного элемента в этом случае протекает весьма интенсивно. Более того, она не прекращается даже при токе через термоэлементы 165 мА, что соответствует температуре предварительного разогрева элемента около 300 °С. Процессы карбонизации сравнительного термоэлемента и смещения нуля измерительного моста аналогично предыдущим случаям взаимосвязаны.

3.3. Исследования работоспособности анализаторов метана в многокомпонентных газовых смесях

Для выполнения экспериментальных исследований анализаторов в многокомпонентных газовых смесях использовалось аттестованное лабораторное оборудование НИПКИ «Автоматуглерудпром», позволяющее моделировать параметры рудничной атмосферы и создавать газоздушные смеси требуемого состава, описание которых приведено во второй главе.

Во время проведения экспериментальных исследований, с целью обеспечения достоверности результатов, при подготовке газовых смесей, установке параметров контролируемой среды (температуры, влажности, подвижности и др.) в основном предполагается использование типовых апробированных методик проведения испытаний и поверки средств контроля содержания метана, разработанных и используемых НИПКИ «Автоматуглерудпром» [74,75].

Испытанием были подвергнуты пять серийных термokatалитических датчиков, выпускаемых ОАО «Красный металлист». При исследованиях были использованы три бинарные аттестованные газоздушные смеси с содержанием горючих компонентов: CH₄ – 1,63 об.%, H₂ - 1,03 об.%, CO - 0,437 об.%, а также

метано-водородо-воздушная смесь с содержанием компонентов: CH_4 - 1,85 об.% и H_2 - 1,5 об.%.

Исследования термогрупп производились при температуре воздуха в помещении $25 \pm 2^\circ\text{C}$ в следующей последовательности:

- испытательная камера установки продувалась чистым атмосферным воздухом;

- испытываемая термогруппа устанавливалась в испытательную камеру и включалась в мостовую измерительную схему ППИ;

- на мостовую измерительную схему от ППИ подавалось стабилизированное напряжение соответствующее номинальной величине напряжения питания термогруппы в стационарных анализаторах и сигнализаторах метана;

- через 15 минут (после полного прогрева термогруппы и установления показаний) производилась балансировка мостовой измерительной схемы (устанавливалось $U_{\text{вых}}=0$);

- в испытательную камеру подавалась аттестованная газоздушная смесь, причем расход подаваемой в камеру газовой смеси устанавливался таким, чтобы за время 5 мин объем газовой смеси поданной в камеру на два порядка превысил объем испытательной камеры;

- через 5 мин после начала подачи газовой смеси с интервалом в 5 с производилось снятие 10 показаний с цифрового табло ППИ, определялось среднее значение показаний при данной газовой смеси и максимальная относительная величина отклонения единичных измерений от среднего значения;

- если максимальная относительная величина отклонения единичных измерений от среднего значения не превышала 5% то испытательная камера продувалась воздухом и в камеру подавалась новая газовая смесь, в противном случае в течении 5 мин осуществлялась продувка камеры воздухом и производились повторные измерения;

- если после выполнения полного цикла исследований показания ППИ после продувки воздухом не превышали 0,1 % , исследования термогруппы считались законченными, а при больших отклонениях термогруппа подвергалась дополнительному старению и испытания повторялись.

Исследования термогрупп выполнялись в следующей последовательности: первоначально газоздушная смесь подавалась к рабочему и сравнительному элементам датчика (использовалась одна серийная термогруппа, оба элемента термогруппы находились в анализируемой смеси), потом смесь подавалась только к рабочему или сравнительному элементам датчика, а вторые элементы находились в чистом воздухе (использовали отдельные элементы двух серийных датчиков, один из которых помещали в анализируемую смесь, а другой находился в воздухе). Раздельная подача газовых смесей к рабочему и сравнительному термоэлементам осуществлялась с целью изучения процесса окисления водорода и оксида углерода на рабочем и сравнительном элементах термokatалитического датчика. Данные испытаний осредненные по пяти датчикам приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Показания датчиков метана в различных газовых смесях

Вид горючего газа и его концентрация в смеси с воздухом	Показания датчиков метана при различных вариантах установки термоэлементов, %об.		
	оба элемента в анализируемой смеси	рабочий элемент - в смеси, сравнительный - в воздухе	сравнительный элемент - в смеси, рабочий - в воздухе
CH ₄ – 1,63 об.%	1,6	1,6	0,0
H ₂ - 1,03 об.%	0,6	1,2	0,6
CO - 0,437 об.%	0,00	0,2	0,2
CH ₄ - 1,85 об.% и H ₂ - 1,5 об.%	1,7	3,5	1,7

В результате этих исследований было установлено, что при подаче водородовоздушной смеси в серийный термокаталитический датчик выходной сигнал мостовой измерительной схемы был в среднем в два раза меньше, чем от метана, а при подаче смеси с содержанием оксида углерода выходной сигнал был равен нулю. При анализе метано-водородо-воздушной смеси выходной сигнал соответствовал 1,7 об.% CH₄, т.е. фактически был меньше, чем если бы в смеси был только метан.

При подаче водородовоздушной смеси только к рабочему элементу датчика оказалось, что выходной сигнал мостовой измерительной схемы увеличился в два раза. В этом же случае датчики стабильно реагируют на оксид углерода (концентрация CO 0,437 об.% обеспечивает показания на табло анализатора метана 0,2 об.%), а при подаче метано-водородо-воздушной смеси выходной сигнал составил 3,5 об.%, что несколько больше суммарной концентрации метана и водорода в смеси.

Следует отметить, что в ранних конструкциях термокаталитических датчиков теплообмен элементов датчика с анализируемой смесью и ее доставка к ним происходили в основном за счет теплоотдачи и свободной конвекции, что обуславливалось значительными размерами реакционной камеры датчиков (внутренний диаметр около 15 мм и высота 15-20 мм). При этом тепловой эффект, возникающий от беспламенного сжигания любого горючего газа на рабочем элементе датчика, принимался пропорциональным произведению теплоты окисления этого компонента на его коэффициент диффузии в степени 2/3 [76].

Современные термокаталитические датчики, изготавливаемые в настоящее время, как в Украине, так и за рубежом, имеют значительно меньшие габариты. Камера реакции выполняется из керамики или металлокерамики с внутренним диаметром 5-6 мм. Для исключения влияния рабочего и сравнительного элементов друг на друга они разделены экраном, т.е. эффективный диаметр камер, в которых расположены элементы, будет не более 3 мм, что практически исключает свободную конвекцию. Доставка компонентов анализируемого воздуха и теплообмен со средой в таких датчиках осуществляется за счет диффузии и теплопроводности как в кондуктометрических датчиках.

В этом случае тепловой поток, выделяющийся на рабочем элементе термодатчика, будет определяться свойствами катализатора, конструкцией элемента и пропорционален произведению теплоты окисления горючего компонента на его коэффициент диффузии:

$$Q = KgDC, \quad (3.4)$$

где K – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности датчика и свойства катализатора, $\text{Кмоль}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; g – удельная теплота окисления горючего компонента, $\text{Дж}/\text{Кмоль}$; D – коэффициент диффузии горючего компонента, $\text{м}^2/\text{с}$; C – объемное содержание горючего компонента.

Рудничный воздух в аварийных ситуациях можно рассматривать как смесь горючих газов, а каждый из них диффундирует независимо со своим коэффициентом диффузии. При этом тепловой эффект от каждого горючего компонента также независим, а тепловой поток от реакции окисления горючих компонентов и выходной сигнал датчика должны быть равны сумме теплового эффекта и сумме выходных сигналов от каждого компонента.

В таком случае с учетом данных табл. 1.2 тепловой эффект от реакции окисления горючих компонентов газовых смесей на рабочем элементе термодатчика будет:

$$\text{для метана } Q_{\text{CH}_4} = 174,44 \cdot 10^2 \cdot K \cdot C_{\text{CH}_4};$$

$$\text{для водорода } Q_{\text{H}_2} = 189,42 \cdot 10^2 \cdot K \cdot C_{\text{H}_2};$$

$$\text{для оксида углерода } Q_{\text{CO}} = 49,24 \cdot 10^2 \cdot K \cdot C_{\text{CO}}.$$

Отсюда видно, что удельный тепловой эффект (на 1 об.%) от реакции окисления водорода на рабочем элементе датчика должен быть в 1,08 раза больше, чем от метана, а удельные тепловыделения по оксиду углерода составляют 0,28 от тепловыделения по метану. В таком случае при отдельной установке рабочего и сравнительного термоэлемента и подаче газовой смеси с содержанием водорода 1,03 об.% только к рабочему термоэлементу, выходной сигнал датчика градуированного по метану должен составлять 1,12 об.%, что в общем то совпадает с результатами наблюдений (табл. 3.4). Аналогичное совпадение результатов характерно и при подаче других смесей только к рабочему термоэлементу датчиков.

Подача газовых смесей только к сравнительным элементам термодатчиков показала, что водород и оксид углерода весьма активно окисляются и на этом элементе, причем последний с одинаковой скоростью. При подаче метано-водородо-воздушной смеси к сравнительным элементам выходной сигнал составил 1,7 об.%, т.е. практически такой, как в случае подачи смеси к обоим элементам датчика метана. Это свидетельствует о том, что водород приводит к активизации сравнительного элемента термодатчика и на нем горит не только водород, но и частично начинает окисляться метан. В целом это свидетельствует о непригодности серийного термодатчика метана для работы в аварийных условиях, так как при образовании в рудничной атмосфере взрывной концентрации метана и наличии в ней водорода и оксида углерода применение серийных термодатчиков приводит к ложным показаниям, что может привести к авариям.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования термokatалитических датчиков метана после их длительной работы в шахтных условиях, выполненные исследования процессов накопления продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов и исследования работоспособности анализаторов метана в многокомпонентных газовых смесях позволяют сделать следующие выводы.

1. Существующие термokatалитические анализаторы метана, для которых характерной является однозначность показаний в диапазоне концентраций от 0 до 100 об.%, в процессе эксплуатации в шахтных условиях не всегда обеспечивают надежную работу средств газовой защиты при аварийных загазованиях выработок шахт. При высоких концентрациях метана, когда лимитирующим агентом является кислород в таких анализаторах наблюдаются провалы характеристики $U_{вых}=f(C)$ (резкое снижение выходного сигнала), что обуславливает неоднозначность срабатывания сигнализации и защитного отключения.

2. При увеличении концентрации метана от 0 до 100 об.% провалы характеристики $U_{вых}=f(C)$ у анализаторов метана длительно проработавших в шахтных условиях наблюдаются при концентрации метана в камере более 30 об.%, а при обратном ходе от 100 до 0 об.% метана снижение выходного сигнала наблюдается вплоть до 20 об.% и при наличии в рудничном газе высших гомологов метана затягивается до 10 об.% смеси горючих газов.

3. Провалы характеристики $U_{вых}=f(C)$ у анализаторов метана длительно проработавших в шахтных условиях возникают в результате возникновения горения метана на сравнительном элементе, активизация которого обуславливается накоплением на его поверхности продуктов термической деструкции углеводородов, а также дополнительным разогревом сравнительного элемента в результате окисления на нем высших гомологов метана, водорода и оксида углерода, присутствующих в рудничном газе.

4. Накопление на поверхности чувствительных элементов продуктов термической деструкции углеводородов, которое происходит в процессе эксплуатации термokatалитических датчиков метана, приводит к изменению их каталитической активности, причем карбонизация рабочего элемента снижает, а карбонизация сравнительного элемента повышает активность элемента по отношению к метану.

5. Карбонизация рабочего элемента в основном обуславливается неполным сгоранием метана на его поверхности и усиливается при низкой температуре разогрева, а карбонизация сравнительного элемента возникает из-за неполного сгорания на его поверхности высших гомологов метана и частично окисления метана, повышение температуры предварительного нагрева этого элемента приводит к более интенсивному окислению метана и ускорению процессов его карбонизации.

6. В нормальных условиях эксплуатации анализаторов метана накопление продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности чувствительного элемента практически исключается и сохраняется практически неиз-

менной чувствительность термогруппы при температуре предварительного разогрева чувствительного элемента более 410 °С.

7. В отличие от чувствительного элемента, при повышении температуры предварительного разогрева элементов до 410 °С, карбонизация сравнительного элемента протекает весьма интенсивно, что приводит к существенному смещению нуля мостовой измерительной схемы, а для предотвращения этого явления следует выбирать температуру предварительного нагрева сравнительного элемента менее 350 °С.

8. При работе термокаталитических датчиков в смесях с высокой концентрацией метана, когда лимитирующим агентом становится кислород, накопление продуктов термической деструкции углеводородов на рабочем и сравнительном элементах протекает более интенсивно, чем при работе в области низких концентраций метана.

9. Как и при нормальных условиях эксплуатации анализаторов метана, для предотвращения карбонизации рабочего элемента в смесях с высокой концентрацией метана следует выбирать температуру предварительного нагрева этого элемента более 410 °С, однако в последнем случае выбор температуры предварительного нагрева сравнительного элемента менее 350 °С не полностью исключает процесс его карбонизации.

10. Присутствие в рудничном газе высших гомологов метана не оказывает влияния на процессы карбонизации чувствительных элементов, карбонизация же сравнительных элементов в этом случае протекает более интенсивно и не прекращается даже при снижении температуры их предварительного разогрева до 300 °С.

11. При номинальном режиме работы термокаталитических датчиков метана водород и оксид углерода, которые могут присутствовать в рудничном газе, активно окисляются не только на рабочем, но и на сравнительном элементе датчика, причем выходной сигнал анализаторов метана в многокомпонентной смеси меньше, чем отдельно от метана, присутствующего в смеси, что свидетельствует об активизации сравнительного элемента и частичном окислении на нем метана.

12. Повысить достоверность оценки взрывчатых свойств многокомпонентной газовой смеси, содержащей водород и оксид углерода, можно при раздельной установке рабочего и сравнительного термоэлемента и подаче газовой смеси только к рабочему термоэлементу, при этом выходной сигнал датчика метана является пропорциональным сумме произведений концентраций отдельных компонентов на их удельную теплотворную способность и коэффициент диффузии.

13. В аварийных условиях (при взрывах, пожарах, внезапных выбросах угля, породы и газа), когда помимо метана в атмосфере горных выработок могут в значительных количествах присутствовать водород, оксид углерода и высшие гомологи метана, существующие термокаталитические датчики не обеспечивают требуемой точности контроля взрывоопасности газовой смеси.

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КАТАЛИЗА И ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

4.1. Исследования причин неустойчивости нулевых показаний термокаталитических датчиков

В идеальном случае при тщательном изготовлении термокаталитических датчиков, обеспечивающем идентичность характеристик каталитически активного и компенсационного элементов, метод обладает высокой чувствительностью; на результаты измерения не влияют температура, давление состав атмосферы, а также колебания напряжения, питающего термогруппу (в небольших пределах). Однако, при практической реализации метода, очень трудно достичь идентичности характеристик элементов и поэтому все выпускаемые технические средства имеют относительно большую погрешность измерения (типовое значение основной абсолютной погрешности измерения $\pm 0,2$ %об. CH_4).

Для наглядности на рис. 4.1 приведен типичный вид кривых, описывающих зависимость выходного напряжения измерительного моста от питающего напряжения при неравенстве параметров термоэлементов (в данном случае экспериментально снятые для термогрупп при $R_p > R_k$ и $R_k > R_p$).

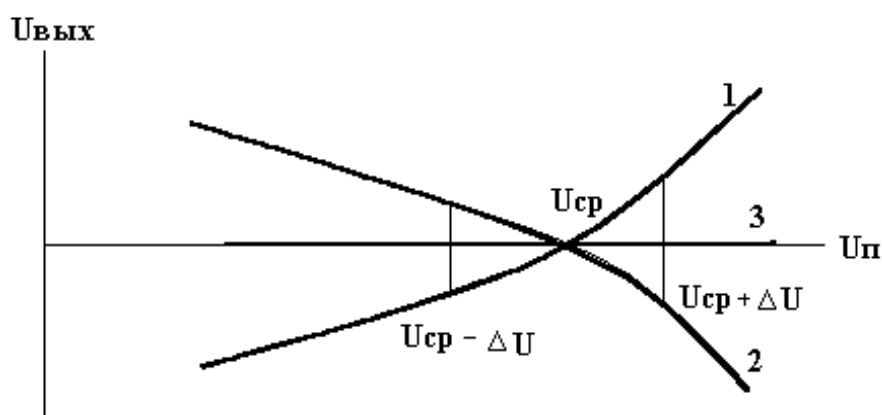


Рис. 4.1. Зависимость выходного напряжения измерительного моста от напряжения питания: 1 – при $R_p > R_k$; 2 – при $R_k > R_p$; 3 – после термической балансировки.

Измерительные мосты уравнивались при напряжении питания $U_{\text{сп}}$. При изменении питающего напряжения в данном случае наблюдается уход нуля измерительного моста, который при определенных условиях является сопоставимым с информационным сигналом. Аналогичный характер имеет зависимость выходного напряжения измерительного моста при изменении влияний иных влияющих параметров.

Для выяснения причин ухода нуля измерительного моста рассмотрим наиболее часто применяемую схему включения термокаталитического датчика

с последовательным расположением в одном плече измерительного моста термозадающих элементов (рис. 2.1).

Условие равновесия измерительного моста при отсутствии горючего газа, имеет вид

$$\frac{R_p}{R_k} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (4.1)$$

Если величина отношения $R_1 / R_2 = const$ и не зависит от изменения влияющих факторов, то условием сохранения баланса моста при изменении факторов, влияющих на величину сопротивления элементов будет

$$\frac{R_p + \Delta R_p}{R_k + \Delta R_k} = \frac{R_p}{R_k}. \quad (4.2)$$

Выполнив преобразования и перейдя от приращения сопротивлений к их дифференциалам, получим условие неизменности баланса моста в виде

$$\frac{R_p}{R_k} = \frac{dR_p}{dR_k}. \quad (4.3)$$

Величина сопротивления элементов в чистом воздухе может быть определена из равенства [13]

$$P_3 = \alpha_3 F_3 (t_3 - t_2) \quad (4.4)$$

где P_3 - мощность, потребляемая элементом;

α_3 - суммарный коэффициент теплоотдачи элемента;

t_3, t_2 - температура элемента и газа, соответственно.

С учетом зависимости величины сопротивления терморезистора, изготовленного из платиновой проволоки, от температуры

$$R_3 = R_{30} (1 + \beta_3 t_3), \quad (4.5)$$

выразим мощность через величину тока, протекающего через элемент, и его сопротивление

$$I^2 R_3 = \alpha_3 F_3 \left(\frac{R_3 - R_{30}}{\beta_3 R_{30}} - t_2 \right). \quad (4.6)$$

Здесь R_{30} - сопротивление элемента при нулевой температуре;

β_3 - температурный коэффициент сопротивления элемента.

Решив (4.6) относительно R_3 , имеем

$$R_3 = R_{30} \left(\frac{1 - \beta_3 t_2}{1 - \frac{\beta_3 I^2 R_{30}}{\alpha_3 F_3}} \right) \quad (4.7)$$

В общем случае из величин, входящих в уравнение (4.7), переменными являются t_2, I_2 и α_2 , причем все они являются взаимосвязанными, так как изменение t_2 влечет за собой изменение I_2 (при питании от источника напряжения), а изменение I_2 приводит к изменению температуры элемента и влияет на α_2 . Две из величин t_2 и I_2 можно стабилизировать, например, при питании элементов от источника стабильного тока и работе при постоянной температуре газа, поэтому рассмотрим условие (4.3), прежде всего, при изменении величины α_2 .

Подставив в уравнение (4.7) значение соответствующих величин рабочего и компенсационного элементов, имеем

$$R_p = R_{po} \left(\frac{1 + \beta_p t_2}{1 - \frac{\beta_p I_p^2 R_{po}}{\alpha_p F_p}} \right), \quad (4.8)$$

$$R_k = R_{ko} \left(\frac{1 + \beta_k t_2}{1 - \frac{\beta_k I_k^2 R_{ko}}{\alpha_k F_k}} \right)$$

Для упрощения выкладок, рассмотрим условие, при котором отсутствует дрейф нуля измерительного моста при неидентичном значении одного из параметров, например, площади элементов, считая, что остальные параметры идентичны: $\beta_p = \beta_k = \beta_2$; $R_{po} = R_{ko} = R_2$; $\alpha_p = \alpha_k = \alpha_2$.

В этом случае, продифференцировав выражение (4.8) по α , подставив значение полученных величин в выражение (4.3) и выполнив преобразования, окончательно имеем

$$\frac{I_p^2}{F_p} = \frac{I_k^2}{F_k} \quad (4.9)$$

Из выражения видно, что при традиционной схеме включения термогруппы, то есть равенстве токов, притекающих через элементы, невозможно исключить дрейф нуля при неидентичности хотя бы одного из параметров, так как при $F_p \neq F_k$ условие (4.9) невыполнимо.

Очевидно, что условие можно выполнить при неравенстве токов I_p и I_k , например, при включении элементов в разные плечи моста (рис. 3.2). Значение тока I_p , необходимое в этом случае для исключения дрейфа нуля, будет равно

$$I_p = \sqrt{I_k^2 \frac{F_p}{F_k}}. \quad (4.10)$$

Определим для данного случая величину температуры рабочего и компенсационного элемента. Из уравнения (4.4) с учетом (4.5) и (4.6), имеем

$$t_{\vartheta} = \frac{I_{\vartheta}^2 R_{\vartheta 0} + \alpha_{\vartheta} F_{\vartheta} t_2}{\alpha_{\vartheta} F_{\vartheta} - \beta_{\vartheta} I_{\vartheta}^2 R_{\vartheta 0}} \quad (4.11)$$

При принятых допущениях, температура элементов равна

$$t_k = \frac{I_k^2 R_{\vartheta 0} + \alpha_{\vartheta} F_k t_2}{\alpha_{\vartheta} F_k - \beta_{\vartheta} I_k^2 R_{\vartheta 0}}, \quad (4.12)$$

$$t_p = \frac{I_p^2 R_{\vartheta 0} + \alpha_{\vartheta} F_p t_2}{\alpha_{\vartheta} F_p - \beta_{\vartheta} I_p^2 R_{\vartheta 0}}.$$

Подставив вместо I_p его значение из (4.10), имеем

$$t_p = \frac{I_k^2 \frac{F_p}{F_k} R_{\vartheta 0} + \alpha_{\vartheta} F_p t_2}{\alpha_{\vartheta} F_p - \beta_{\vartheta} I_k^2 \frac{F_p}{F_k} R_{\vartheta 0}} = \frac{I_k^2 R_{\vartheta 0} + \alpha_{\vartheta} F_k t_2}{\alpha_{\vartheta} F_k - \beta_{\vartheta} I_k^2 R_{\vartheta 0}} \quad (4.13)$$

Таким образом, в этом случае температура элементов

$$t_p = t_k \quad (4.14)$$

и, следовательно, для исключения дрейфа нуля измерительного моста необходимо термически уравновешивать элементы.

Аналогичные выкладки можно выполнить при постоянных значениях других влияющих величин, а в общем случае при переменном значении всех влияющих величин условие (4.3) выполняется при соблюдении равенства

$$\frac{\alpha_p}{R_{po}} - \frac{\beta_p}{F_p} I_p^2 = \frac{\alpha_k}{R_{ko}} - \frac{\beta_k}{F_k} I_k^2. \quad (4.15)$$

Откуда для исключения дрейфа необходимо

$$I_p = \sqrt{I_k^2 \frac{F_p \beta_k}{F_k \beta_p} - \left(\frac{\alpha_p}{R_{po}} - \frac{\alpha_k}{R_{ko}} \right) \frac{F_p}{\beta_p}}. \quad (4.16)$$

Полученное выражение не имеет практического значения, так как определить значения параметров элементов экспериментально невозможно. Однако теоретические выкладки указывают на возможность исключения дрейфа нуля измерительного моста при его балансировке, поэтому целесообразно разработать схему включения термокаталитического датчика, позволяющую

осуществлять термическую балансировку элементов и способ практического выполнения балансировки.

4.2. Термокаталитическое окисление горючих газов при неограниченной диффузии контролируемой среды

Погрешности измерения средств контроля содержания метана, возникающие в процессе их эксплуатации, прежде всего, связаны с изменением чувствительности термогруппы, снижением диффузионной проводимости газообменного фильтра и уходом нуля измерительного моста газоанализатора.

Последняя причина, при применении предложенной схемы включения термогруппы с термической балансировкой элементов и использовании современных типов ОУ с малым дрейфом нуля для обработки выходного сигнала, может быть полностью устранена.

Изменение чувствительности термогруппы при эвакуации газоанализаторов в шахтных условиях происходит из-за изменения температуры элементов, старения каталитически активного элемента, заключающегося в изменении пористости элементов и площади каталитически активной зоны, отравления катализатора и др.

Рассмотрим процесс каталитического окисления метана, протекающий при работе серийно выпускаемых термокаталитических датчиков с керамическими или металлокерамическими газообменными фильтрами. В общем случае принимают, что структура каталитических элементов и режим их работы в стационарной и переносной аппаратуре обеспечивают протекание процесса окисления метана в диффузионной области. При этом считают, что возможная скорость химической реакции значительно выше скорости диффузионного процесса к каталитически активной поверхности, а поток метана Q_M , окисляющийся на каталитически активном элементе, определяют как [30]

$$Q_M = \gamma_{\varepsilon} C_{mk}, \quad (4.17)$$

где γ_{ε} – эффективная диффузионная проводимость элемента, м³/с;

C_{mk} – концентрация метана в реакционной камере;

$K_{\varepsilon\phi}$ – коэффициент эффективности окисления метана;

β_m – коэффициент массопередачи, м/с;

F_{ε} – площадь поверхности элемента, м².

В свою очередь концентрация метана в камере

$$C_{mk} = K_m C_{ma}, \quad (4.18)$$

где C_{ma} – концентрация метана в атмосфере;

$K_m = \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{\phi} + \gamma_{\varepsilon}}$ – коэффициент передачи датчика по концентрации;

γ_{ϕ} – диффузионная проводимость фильтра.

Мощность тепловыделения P_m , обусловленного химической реакцией окисления метана на рабочем элементе при этом равна

$$P_m = Q_{mn} C_{ma} \gamma_\phi \gamma_\varepsilon / (\gamma_\varepsilon + \gamma_\phi), \quad (4.19)$$

где Q_{mn} – низшая теплота сгорания метана, Дж/кг.

С учетом выражения (4.4) определим температуру рабочего и сравнительного элемента при наличии метана и питании измерительного моста от источника тока. Такой режим питания является чрезвычайно удобным при применении выносных датчиков метана, так как только при этом может быть обеспечена независимость работы выносного измерительного моста от сопротивления линии связи и изменения сопротивления переходных контактов. В таком случае для компенсационного элемента можно записать

$$t_k = \frac{R_k}{\alpha_k F_k} I^2 + t_2, \quad (4.20)$$

а для рабочего

$$t_p = \frac{R_p}{\alpha_p F_p} I^2 + \frac{P_m}{\alpha_p F_p} + t_2. \quad (4.21)$$

В данных выражениях сопротивления элементов и коэффициент теплоотдачи являются, естественно, зависимыми от температуры. Однако величина отношения $\frac{R_\varepsilon}{\alpha_\varepsilon F_\varepsilon}$, как доказано в работе [13], является величиной постоянной для данного элемента и поэтому для идентичных элементов группы запишем

$$\varepsilon = \frac{R_\varepsilon}{\alpha_\varepsilon F_\varepsilon} = \frac{R_p}{\alpha_p F_p} = \frac{R_k}{\alpha_k F_k} = const \quad (4.22)$$

терморезисторный коэффициент.

В таком случае разница температур элементов определится как

$$\Delta t = t_p - t_k = \frac{P_m}{\alpha_\varepsilon F_\varepsilon} \quad (4.23)$$

а с учетом (4.19) получим

$$\Delta t = \frac{Q_{mn} C_{ma} \gamma_\varepsilon \gamma_\phi}{\alpha_\varepsilon F_\varepsilon (\gamma_\varepsilon + \gamma_\phi)} \quad (4.24)$$

С учетом зависимости величины сопротивления платинового резистора от температуры (4.5) соответственно запишем разницу сопротивлений элементов и величину выходного напряжения моста, уравновешенного при нулевой концентрации метана

$$\Delta R = \frac{R_0 \beta Q_{mn} C_{ma} \gamma_\varepsilon \gamma_\phi}{\alpha_\varepsilon F_\varepsilon (\gamma_\varepsilon + \gamma_\phi)} \quad (4.25)$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{IR_0 \beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}} \gamma_{\text{э}} \gamma_{\text{ф}}}{2\alpha_{\text{э}} F_{\text{э}} (\gamma_{\text{э}} + \gamma_{\text{ф}})} \quad (4.26)$$

Рассмотрим граничные режимы работы термоэлементов:

- работа при отсутствии диффузионного фильтра, когда $\gamma_{\text{ф}} \gg \gamma_{\text{э}}$;
- работа при сильном ограничении диффузии метана в реакционную камеру, когда $\gamma_{\text{ф}} \ll \gamma_{\text{э}}$.

В первом случае при отсутствии фильтра

$$U_{\text{вых}} = \frac{IR_0 \beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}} \gamma_{\text{э}}}{2\alpha_{\text{э}} F_{\text{э}}} \quad (4.27)$$

С учетом (4.17), выразив величину $\alpha_{\text{э}} F_{\text{э}}$ через v , получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{10^{-2} I v \beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}} K_{\text{эф}} \beta_{\text{м}} F_{\text{э}}}{2(1 + \beta v I^2 + \beta t_r)} \quad (4.28)$$

При рассмотрении диффузионного потока метана в [13] получено значение коэффициента массопередачи $\beta_{\text{м}}$ для элемента шарообразной формы в виде

$$\beta_{\text{м}} = 31,8 \cdot 10^{-11} (t_{\text{э}} + t_r + 546)^{1,75} [(2 + 111\alpha^{0,75}) / \alpha] \quad (4.29)$$

где α – определяющий размер элемента.

Заменив значение $t_{\text{э}} + t_r$ через величину тока из выражения (4.21) (без учета дополнительного разогрева от метана), получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{10^{-2} I v \beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}} K_{\text{эф}} P (v I^2 + 546 + 2t_r)^{1,75} F_{\text{э}}}{2(1 + \beta v I^2 + \beta t_r)}, \quad (4.30)$$

где $P = 31,8 \cdot 10^{-11} [(2 + 111\alpha^{0,75}) / \alpha]$.

Анализ выражения (4.30) показывает, что в диапазоне рабочих температур элементов (300-600)°С выходное напряжение с ростом тока монотонно возрастает и не имеет экстремумов. Однако результаты исследований различных каталитически активных элементов, приведенные в [25] и др., а также экспериментальные исследования серийно выпускаемых термогрупп без диффузионного фильтра показывают на наличие четко выраженного экстремума. Так, для серийных термогрупп с платино-палладиевым катализатором и диаметром платиновой проволоки 30 мкм максимум выходного напряжения наблюдается при токе 210-220 мА, что соответствует начальной температуре разогрева элементов 400-440°С.

На рис. 4.2 приведены экспериментальная и расчетная кривые полученные при $C_{\text{ма}} = 1,03\%$. Ввиду невозможности определить точное значение $K_{\text{эф}}$ и $F_{\text{э}}$ для конкретной термогруппы выходное напряжение нормировано по отношению к величине напряжения при токе 200 мА.

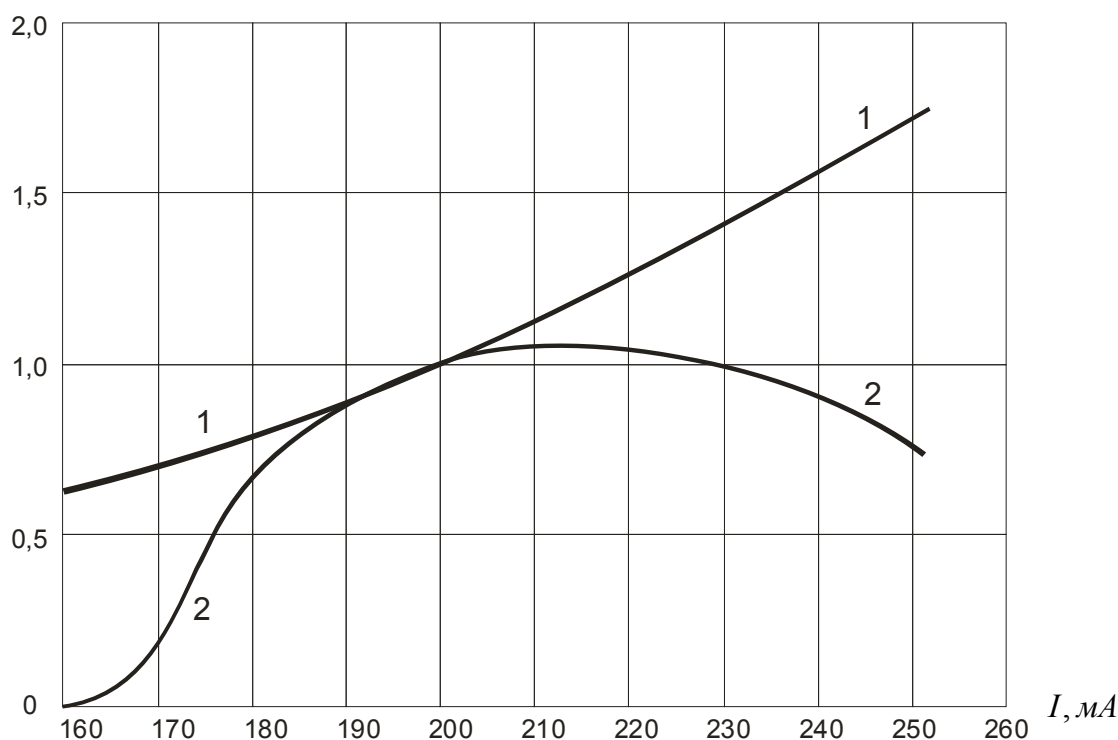


Рис. 4.2. Выходные характеристики измерительного моста при неограниченной диффузии метана: 1 – расчетная характеристика, 2 – экспериментальная характеристика.

Как видно из рисунка, кривые достаточно хорошо совпадают только на относительно узком участке при токах 190-205 мА. Если при меньших токах различия достаточно хорошо объясняются переходом процесса окисления из диффузионной в кинетическую область, то расхождения в ходе кривых при больших токах, исходя из существующих представлений работы датчика, трудно объяснимы.

Источники такого расхождения могут быть ошибки в теоретическом описании зависимостей эффективной диффузионной проводимости элементов от температуры и процессов теплообмена, в части независимости терморезистивного коэффициента « ν » от температуры.

Экспериментально полученные вольтамперные характеристики термодатчиков в чистой среде, а также вольтамперные характеристики сравнительного элемента при наличии метана показали, что при изменении температуры элементов от 300 до 500°C терморезистивный коэффициент остается практически постоянным. Расчет величины « ν » выполнялся исходя из уравнений (4.20) и (4.5). Поэтому ошибки в части описания процессов теплообмена исключены.

Для проверки справедливости заимствованного теоретического описания зависимости эффективной диффузионной проводимости от температуры, нами были выполнены экспериментальные исследования процесса выгорания метана в герметичной камере при различных значениях тока через элементы.

Скорость изменения массы метана в камере во времени определяется потоком окисляющего метана

$$\frac{dm}{dt} = -\gamma_{\varepsilon} C_{MK} \quad (4.31)$$

С учетом того, что

$$C_{MK} = \frac{m}{V_K}$$

где V_K – объем герметичной камеры, решение уравнения имеет вид

$$C_{MK} = C_{MK0} \exp\left(-\frac{\gamma_{\varepsilon} t}{V_K}\right) \quad (4.32)$$

где C_{MK0} – начальная концентрация.

Откуда

$$\gamma_{\varepsilon} = \frac{V_K}{t} l_n \frac{C_{MK0}}{C_{MK}} \quad (4.33)$$

Типичные результаты экспериментальных исследований для произвольно выбранной серийной термогруппы приведены в табл. 4.1. Здесь же представлены нормированные экспериментальные значения γ_{ε} и расчетные значения $\gamma_{\varepsilon p}$ (при зависимости коэффициента массопередачи β_M от температуры элемента определяемой по формуле (4.29)), а также экспериментально измеренное выходное напряжение моста и теоретически рассчитанное напряжение при полученных значениях γ и концентрации метана 1%.

Таблица 4.1

Расчетные и экспериментальные значения параметров термогруппы при неограниченном доступе метана

$I_{ТГ}$, мА	t_{ε} , °С	γ_{ε} , м ³ /с	$\frac{\gamma_{\varepsilon}}{\gamma_{\varepsilon}(200)}$	$\frac{\gamma_{\varepsilon p}}{\gamma_{\varepsilon p}(200)}$	ε , °С/А ²	$U_{\text{вых.э.}}$, мВ	$U_{\text{вых.р.}}$, мВ
175	341	$0,4 \cdot 10^{-7}$	0,33	0,83	$10,4 \cdot 10^3$	17	20,1
180	356	$0,88 \cdot 10^{-7}$	0,73	0,88	$10 \cdot 10^3$	28	45,9
190	390	$1,07 \cdot 10^{-7}$	0,89	0,94	$9,8 \cdot 10^3$	34	55,9
200	427	$1,21 \cdot 10^{-7}$	1	1	$9,75 \cdot 10^3$	38	62,9
210	478	$1,37 \cdot 10^{-7}$	1,13	1,08	$9,9 \cdot 10^3$	39	69,6
220	540	$1,6 \cdot 10^{-7}$	1,32	1,21	$10,3 \cdot 10^3$	38	78,5

Сопоставление зависимости расчетных и экспериментальных нормированных значений γ_{ε} от температуры показывает, что в действительности наблюдается еще более крутая зависимость, чем предложенная автором работы [13], что отчетливо видно на рис. 4.3. Это обуславливает еще более крутой характер зависимости $U_{\text{вых}}$ от $I_{ТГ}$, рассчитанной исходя из экспериментально полученных значений диффузионной проводимости элемента по сравнению с кривой 1 на рис. 4.2, полученной ранее и не объясняет выявленного несоответствия. Сопоставление же абсолютных значений выходного напряжения термо-

группы, полученного экспериментально и рассчитанного, исходя из скорости выгорания метана в герметичной камере, показывает, что реальное значение $U_{\text{вых}}$ почти в два раза ниже расчетных. Это свидетельствует о том, что не вся мощность тепловыделения P_m , обусловленная химической реакцией окисления метана на ТПЭ расходуется на нагрев элемента, поэтому при выводе уравнения теплового баланса рабочего элемента (4.21) необходимо учитывать характер процессов передачи тепла от зоны реакции к рабочему элементу.

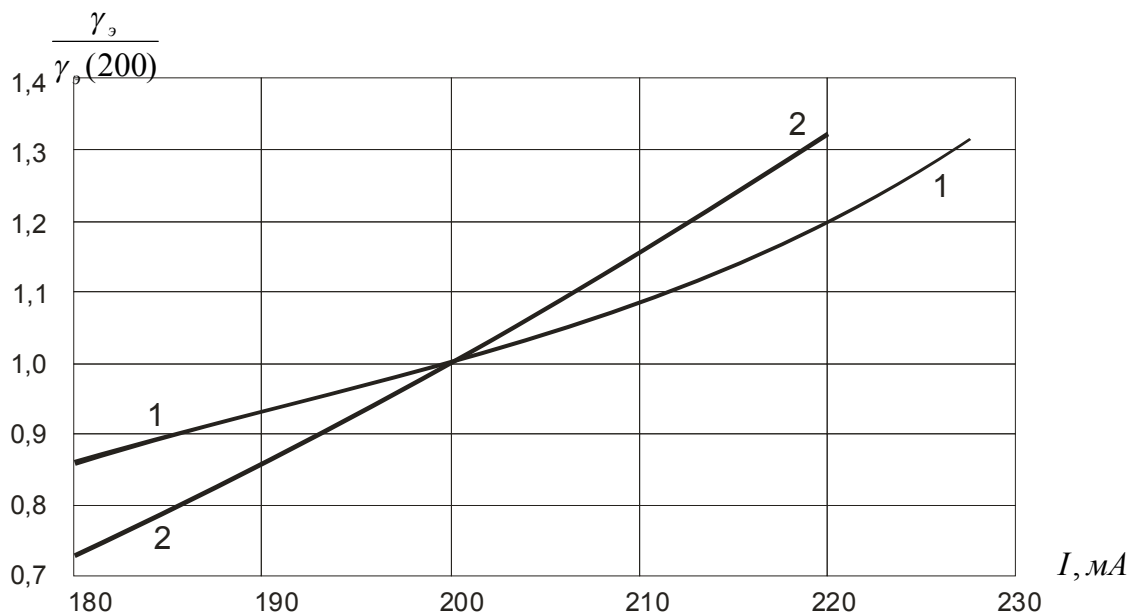


Рис. 4.3. Зависимость эффективной диффузионной проводимости элементов от величины тока. (1 – расчетная, 2 – экспериментальная)

При малом токе и низкой температуре рабочего элемента, когда окисление происходит практически в кинетической области очевидно, реакция горения осуществляется только на разветвленной поверхности каталитически активного элемента, поэтому при токе $I_{\text{тг}}=175\text{мА}$ практически наблюдается совпадение расчетных и экспериментальных результатов. При дальнейшем росте температуры и переходе реакции в диффузионную область характер реакции изменяется. Как указывает Марголис [25] при температурах 400-800°С на поверхности палладиевого катализатора происходит разрыв химических связей молекулы O_2 с образованием атомарного кислорода и частичной его десорбцией, то есть на поверхности катализатора наблюдается постоянный кислородный обмен.

В таком случае, очевидно, процессы окисления метана активным атомарным кислородным могут происходить на некотором расстоянии от поверхности катализатора, что вызывает дополнительное рассеяние энергии реакции и снижение реального выходного напряжения по сравнению с расчетным.

Экспериментальные исследования термогрупп показали, что в диапазоне токов 180-210 мА с достаточной для практических целей точностью можно считать, что

$$U_{\text{вых.э.}} \approx 0,6U_{\text{вых.р.}}$$

С учетом этого в данном диапазоне токов уравнение (4.26) можно записать в виде

$$U_{\text{вых}} = \frac{0,3IR_0\beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}}\gamma_{\text{э}}\gamma_{\text{ф}}}{\alpha_{\text{э}}F_{\text{э}}(\gamma_{\text{э}} + \gamma_{\text{ф}})}, \quad (4.34)$$

или выразив $\alpha_{\text{э}}F_{\text{э}}$ через ν

$$U_{\text{вых}} = \frac{0,3I\beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}}\gamma_{\text{э}}\gamma_{\text{ф}}\nu}{(1 + \beta t_{\text{э}})(\gamma_{\text{э}} + \gamma_{\text{ф}})} \quad (4.35)$$

Выполнение исследования работы ТПЭ без диффузионного фильтра указывает на существенную зависимость $U_{\text{вых}}$ от активности катализатора, величины питающего тока, температуры среды и др. факторов. Кроме того, существенный разогрев рабочего элемента при высоких концентрациях приводит к быстрому износу элементов и появлению значительной нелинейности характеристики термогруппы по концентрации.

4.3. Термокаталитическое окисление горючих газов при сильном ограничении диффузии контролируемой среды

При сильном ограничении диффузии метана в реакционную камеру, когда $\gamma_{\text{ф}} \ll \gamma_{\text{э}}$

уравнение (4.35) примет вид

$$U_{\text{вых}} = \frac{0,3I\beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}}\gamma_{\text{ф}}\nu}{1 + \beta t_{\text{э}}} \quad (4.36)$$

Учитывая то, что при большом сопротивлении газодиффузионного фильтра концентрация метана в реакционной камере незначительна и соответственно незначительный дополнительный разогрев элементов от сгорания метана подставим в уравнение (4.36) значение $t_{\text{э}}$ с (4.21) без учета этого разогрева. Тогда

$$U_{\text{вых}} = \frac{0,3I\beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}}\gamma_{\text{ф}}\nu}{1 + \beta I^2 \nu + \beta t_r} \quad (4.37)$$

При постоянном значении t_r выражение в знаменателе в диапазоне токов 180-210 мА практически линейно зависит от тока, с погрешностью не более трех процентов можно записать

$$1 + \beta \nu I^2 + \beta t_r = \nu_1 \nu I \quad (4.38)$$

Значение коэффициента ν_1 для исследованных термогрупп при $t_r=30^\circ\text{C}$, например, составляет $\nu_1=1,355 \cdot 10^{-3}$. В таком случае для

$$U_{\text{вых}} = \frac{0,3I\beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}}\gamma_{\text{ф}}\nu}{\nu_1 \nu I} = \nu_2 \beta Q_{\text{мн}} C_{\text{ма}}\gamma_{\text{ф}} \quad (4.39)$$

где $\nu_2=0,3/\nu_1$.

Выполненные расчеты показывают, что при изменении t_r в диапазоне от 30°C до 70°C значение коэффициента ϵ_2 находится в пределах от 240 при $t_r=30^\circ\text{C}$ до 214 при $t_r=70^\circ\text{C}$.

Как видно из полученного выражения выходное напряжение измерительного моста при работе термогруппы в диффузионной области и сильном ограничении диффузии не зависит от параметров термогруппы и величины тока, а определяется практически значением γ_ϕ . При обеспечении постоянного значения γ_ϕ обеспечивается равенство выходных напряжений термогрупп независимо от разброса их характеристик, времени работы и снижения активности катализатора.

Серийно выпускаемые новые термогруппы с керамическим или металло-керамическим газодиффузионным фильтром, как правило, имеют малое сопротивление фильтра $\gamma_\phi=(2 - 5)\gamma_3$. По мере длительной эксплуатации в загрязненной среде наблюдается дополнительное увеличение его сопротивления, поэтому простое увеличение сопротивления фильтра, за счет уменьшения его пористости и увеличение толщины, неприемлемо.

Для реализации режима работы с сильным ограничением диффузии необходима разработка новой конструкции термодатчика.

Выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Неоднозначность характеристик рабочего и сравнительного элементов термогруппы обуславливает возникновение погрешности измерения при изменении параметров питания и условий эксплуатации. Снижение этой погрешности может быть обеспечено при термической балансировке измерительного моста.

2. При слабом ограничении диффузии контролируемой среды выходное напряжение измерительного моста существенно зависит от изменения параметров питания, активности катализатора и условий эксплуатации.

3. При работе датчика в диффузионной области теплоприток к рабочему элементу, обусловленный сгоранием метана, составляет около 60% от количества тепла, образующегося в результате горения. Часть тепла рассеивается в среде и не приводит к нагреву элемента.

4. Сильное ограничение диффузии контролируемой среды в реакционную камеру позволяет значительно снизить погрешности измерения, связанные с изменением активности элемента, расширить линейный диапазон измеряемых концентраций, исключить возможность перегрева и выхода со строя термогруппы, снизить потребляемую мощность.

ГЛАВА 5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОДНОЗНАЧНОСТИ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ МЕТАНА В РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

5.1. Повышение стабильности нулевых показаний термокаталитических датчиков

Выполненные в предыдущем разделе исследования причин нестабильности нулевых показаний термокаталитических датчиков показали на наличие возможности исключения дрейфа нуля измерительного моста путем его соответствующей балансировки. Рассмотрим возможность осуществления термической балансировки термогрупп на конкретном примере.

Среди всех исследованных термогрупп наибольшие смещения нулевых показаний при изменении параметров среды и питания наблюдаются в случае, когда напряжение на сравнительном элементе в номинальном режиме существенно (20 – 45 мВ) отличается от напряжения на рабочем элементе (см. рис. 2.22, 2.23). При применении таких термогрупп для установления нуля мостовой измерительной схемы требуется существенное смещение потенциала точки "В" мостовой измерительной схемы (см. рис. 2.1), что эквивалентно смещению вольтамперной характеристики одного из элементов на такое же напряжение. Как видно из рис. 2.23, уход нуля при изменении газового состава может достигать в таком случае десятков милливольт. Аналогичная ситуация наблюдается в этом случае и при изменении других влияющих параметров, например напряжения питания или температуры среды.

Очевидно, что повысить стабильности нулевых показаний можно путем обеспечения идентичности вольтамперных характеристик вблизи рабочей точки термогруппы. При применении серийно выпускаемых термогрупп и принятой методике подбора термоэлементов подбор вольтамперных характеристик элементов может быть осуществлен путем включения шунтирующих резисторов параллельно термоэлементу с большей крутизной характеристики вблизи рабочей точки термогруппы, или дополнительного резистора последовательно с другим термоэлементом.

При практической реализации подбор дополнительного резистора, сопротивление которого составляет десятые доли Ома, весьма затруднен. Кроме того введение такого резистора незначительно влияет на крутизну вольтамперной характеристики элементов. Поэтому предпочтительной является подгонка вольтамперных характеристик элементов путем включения шунтирующих резисторов. Теоретические аспекты такой балансировки термогруппы рассмотрены нами выше. Практическая ее реализация показала, что стабильность нуля измерительного моста после подгонки вольтамперных характеристик путем шунтирования элементов увеличивается более чем на порядок.

Для наглядности покажем это на примере выбракованной термогруппы, по причине существенного отличия параметров термоэлементов, в которой напряжение на компенсационном элементе при номинальном режиме эксплуатации значительно (245 мВ) превышает напряжение на рабочем элементе.

Учитывая то, что компенсирующий термоэлемент этой термогруппы имеет большую крутизну характеристики, шунтирующий резистор включается параллельно этому элементу (рис. 5.1). Начальные вольтамперные характеристики сравнительного и рабочего элементов приведены на рис. 5.2 (кривые 1 и 2).

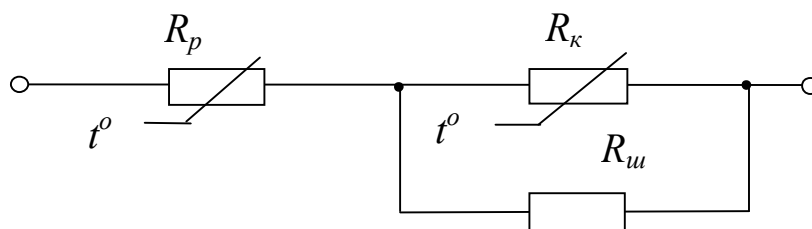


Рис. 5.1. Схема включения шунтирующего резистора при балансировке

Установка нуля мостовой измерительной схемы путем смещения потенциала точки B мостовой измерительной схемы (см. рис.2.1) на 245 мВ, эквивалентна смещению характеристики рабочего элемента на такую же величину напряжения (кривая 3). Изменение величины тока через термоэлементы на ± 10 мА вызывает в этом случае уход нуля измерительного моста на ± 40 мВ (см. рис. 5.2).

При включении параллельно сравнительному элементу шунтирующего резистора величиной $R_{ш} = 40$ Ом (кривая 5, рис. 5.2), вольтамперная характеристика параллельной цепочки, состоящая из этого резистора и сравнительного элемента, смещается вниз (кривая 4, рис. 5.2) и пересекает характеристику рабочего элемента при $I=180$ мА без смещения потенциала точки B мостовой измерительной схемы (см. рис. 2.1). В этом случае изменение величины тока через термоэлементы на ± 10 мА вызывает уход нуля измерительного моста на ± 5 мВ (см. рис 5.2), что практически на порядок меньше чем в предыдущем случае. Причем меняется не только величина, но и характер смещения нуля. Если в первом случае, при уменьшении тока через элементы (что эквивалентно снижению температуры среды или увеличению ее теплопроводности) нуль уходит в область положительных значений выходного напряжения, то во втором – в область отрицательных его значений.

Разный характер смещения нуля мостовой измерительной схемы, позволяет подобрать при настройке такой промежуточный режим, при котором в рабочей области практически выравниваются температурные режимы термоэлементов и исключается уход нуля измерительного моста при возможных изменениях параметров среды и питания. В нашем случае (для бракованной термогруппы с величиной отклонения напряжений на элементах в 10 раз превышающей допустимые) минимальный уход нуля ($\pm 1,2$ мВ), в случае изменение величины тока через термоэлементы на ± 10 мА, достигается при величине смещения потенциала точки B мостовой измерительной схемы (см. рис.2.1) на 22 мВ и величине $R_{ш} = 46$ Ом.

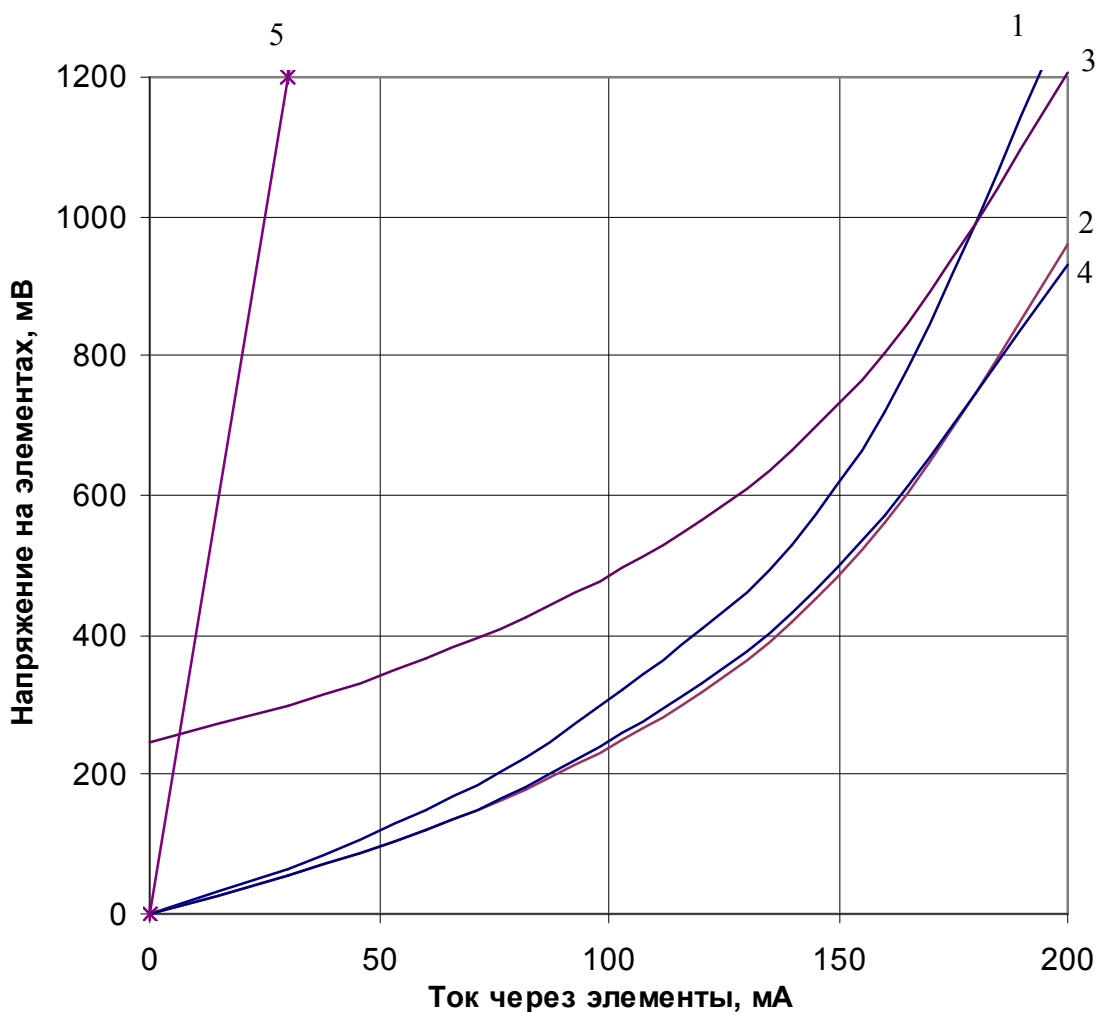


Рис. 5.2. Вольтамперные характеристики элементов термогруппы: 1,2 – сравнительного и рабочего элементов до балансировки; 3 - рабочего элемента при сдвиге на 245 мВ; 4 - сравнительного элемента шунтированного резистором 40 Ом; 5 - шунтирующего резистора.

Наиболее просто при настройке и эксплуатации термокаталитических ПП изменять величину тока через элементы посредством изменения величины напряжения, питающего измерительный мост, а термическую балансировку элементов осуществлять путем их шунтирования дополнительным резистором при последовательной схеме включения (рис. 5.1).

На рис. 5.3 приведена предложенная нами схема включения термокаталитического датчика, позволяющая осуществлять его термическую балансировку.

Введение резисторной цепочки шунтирующей элементы, при определенном подборе величин сопротивления шунтов, позволяет выровнять температуру элементов. Так как при изменении сопротивлений шунтирующих элементов происходит также разбаланс моста, необходимо разработать достаточно простой способ балансировки предложенной схемы включения. В качестве параметра, при изменениях которого целесообразно осуществлять балансировку, очевидно, следует взять напряжение питания измерительного моста, а баланси-

ровку осуществлять при низкочастотной модуляции напряжения, причем глубину модуляции ΔU необходимо выбирать с учетом возможных колебаний влияющих факторов, приведенных к колебанию питающего напряжения. Частоту модулирующего напряжения необходимо выбрать с учетом инерционных свойств термогруппы, в диапазоне от 0,1 до 0,2 Гц.

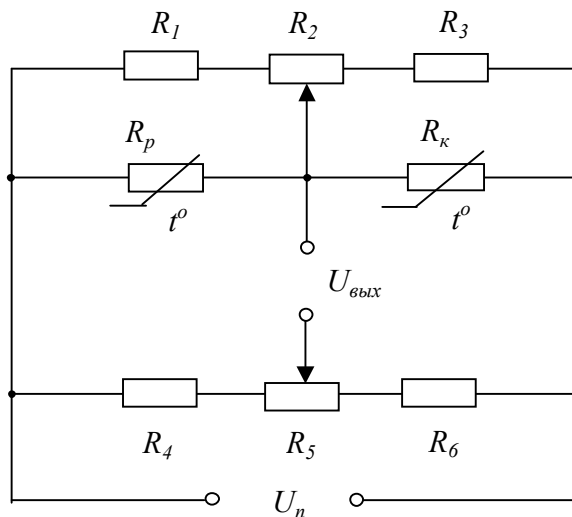


Рис. 5.3. Схема включения термокаталитического датчика с термической балансировкой элементов.

При подаче на измерительный мост напряжения модулированного низкой частотой (рис. 5.4) на выходе несбалансированного моста наблюдается модулированное той же частотой напряжение (кривая 1, рис. 5.5) величина амплитуды которого определяется степенью неуравновешенности моста.

Балансировка моста осуществляется в следующей последовательности. Вначале резистор R_2 устанавливают в положение, при котором отсутствует низкочастотная модуляция выходного напряжения измерительного моста (кривая 2, рис. 5.5). Затем резистором R_5 устанавливают среднее значение выходного напряжения моста равное нулю. Так как при этом частично нарушаются условия работы термогруппы, то на выходе измерительного моста снова наблюдается низкочастотная составляющая, но с меньшей амплитудой колебаний (кривая 3, рис. 6). Указанные операции повторяют до полной балансировки моста (кривая 4, рис. 5.5), для чего обычно требуется 3-4 цикла регулировки.

Приведенная схема включения термогруппы и предложенный порядок ее балансировки исследованы на термогруппах серийно выпускаемых НПО «Красный металлист» и применяемых в стационарной и переносной аппаратуре контроля содержания метана. В результате установлено, что предложенное решение позволяет практически полностью исключить уход нуля измерительного моста при колебаниях питающего напряжения и других влияющих факторов.

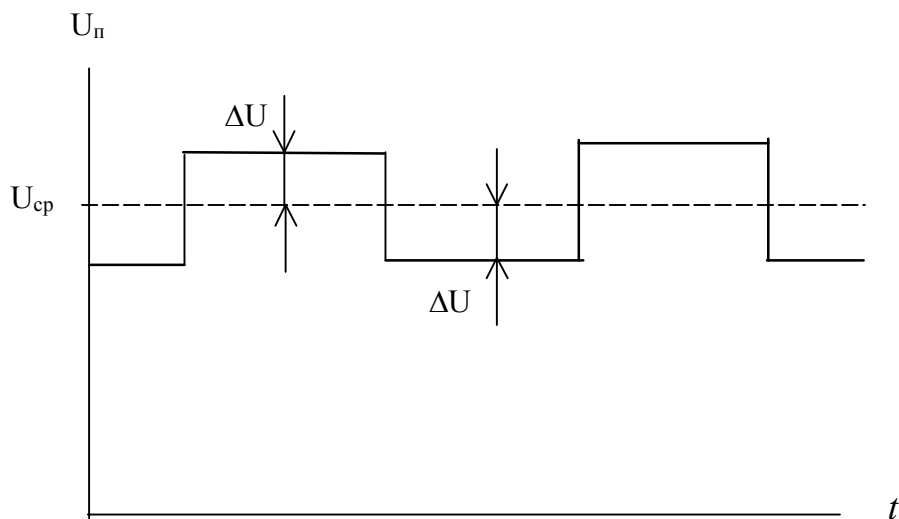


Рис. 5.4. Напряжение питания термогруппы при ее термической балансировке.

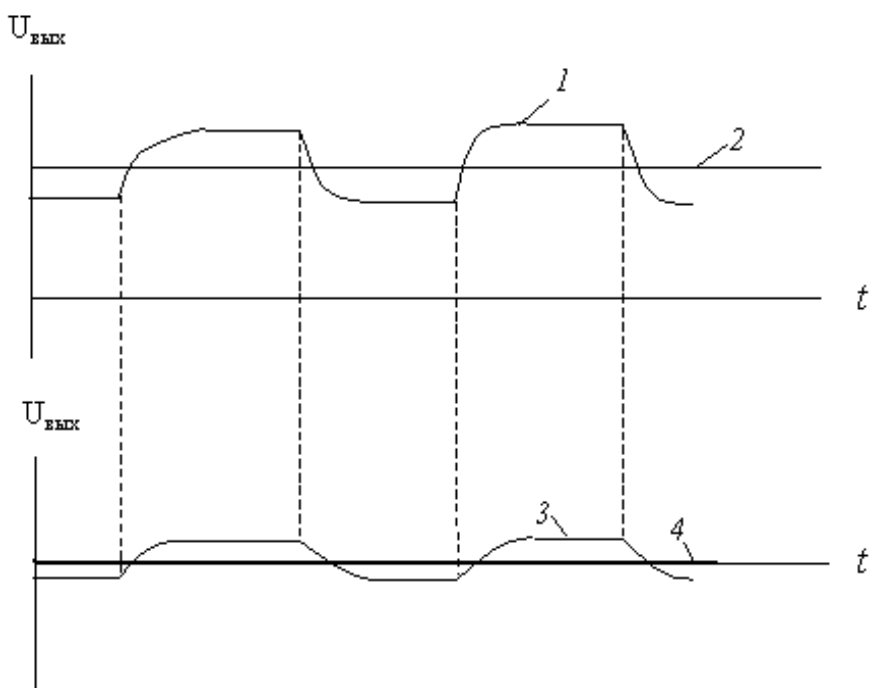


Рис. 5.5. Выходное напряжение измерительного моста при балансировке

В производственных условиях балансировку моста можно осуществить, изменяя величину питающего термогруппу напряжения вручную, при помощи микропереключателя. В этом случае порядок балансировки следующий:

1. Устанавливают переключателем минимально возможное напряжение на термогруппе.

2. После окончания переходного процесса ($\approx 5c$) резистором R_5 устанавливают «0» измерительного моста.

3. Устанавливают максимально возможное напряжение на термогруппе.

4. При появлении разбаланса, после окончания переходного процесса, подстраивают измерительный мост резистором R_2 и снова повторяют все операции.

При выполнении пункта 4, для ускорения процесса, целесообразно резистором R_2 устанавливать не «0» моста, а осуществлять 2-4 кратное перерегулирование, то есть, например, если уход нуля составлял +2 мВ, следует установить резистором –6 мВ, а в измерительных мостах переменного тока, вращая в одну сторону резистор 2, вначале добиться «0» измерительного моста и довести выходное напряжение до 6 мВ. В таком случае для полной балансировки моста требуется 3-4 цикла подстройки.

Предложенная балансировка измерительного моста дает возможность значительно улучшить метрологические характеристики существующих средств контроля. Так, для серийно изготовленных термогрупп уход нуля мостовой измерительной схемы после такой балансировки (при изменении величины тока через термоэлементы на ± 10 мА) не превышает $\pm 0,3$ мВ. Учитывая это балансировка элементов может быть рекомендована к повсеместному использованию в термокаталитических средствах контроля метана, а кроме того область применения ее может быть расширена и на другие средства измерения в которых используются термоэлементы, в частности на термокондуктометрические средства контроля, термоанемометры и др. Это открывает также новые возможности, с точки зрения автоматизации процессов контроля и автоматической диагностики стационарных средств контроля, поскольку отсутствие сдвига нуля измерительного моста при снижении напряжения питания термогруппы позволяет осуществлять проверку нулевых показаний средств контроля при наличии метана в контролируемой среде.

5.2. Улучшение временной стабильности термокаталитических датчиков

Предложенная балансировка термоэлементов позволяет существенно улучшить метрологические характеристики термокаталитических датчиков, однако, из-за изменения коэффициента черноты сравнительного элемента, не решает вопроса обеспечения стабильности этих характеристик в процессе длительной эксплуатации средств контроля метана. Изменение коэффициента черноты сравнительного элемента, за счет увеличения доли радиационного теплообмена, приводит к снижению температуры начального разогрева сравнительного элемента и смещению нуля в область положительных значений и в сбалансированной термогруппе.

Предотвратить смещение нуля в процессе эксплуатации можно в случае если после изготовления термогруппы сравнительный элемент будет иметь коэффициент черноты близкий по величине значению соответствующего коэффициента после длительной эксплуатации в шахтных условиях. В этом случае науглераживание сравнительного элемента в процессе эксплуатации не будет приводить к изменению его тепловых характеристик.

Для изменения окраски сравнительного элемента изготовленного из γ -окси алюминия могут быть использованы покрытия удовлетворяющие следующим требованиям:

- вещество покрытия должно быть химически стойким и не изменять свои характеристики в процессе длительной эксплуатации;

- коэффициент черноты сравнительного элемента с нанесенным покрытием должен быть близким к коэффициенту черноты сильно науглероженной поверхности элемента;

- вещество покрытия не должно проводить к появлению реакции окисления метана на поверхности сравнительного элемента при максимально возможных температурах его разогрева, то есть повышать его каталитическую активность;

- вещество покрытия должно обеспечивать высокую технологичность процесса нанесения покрытия и не приводить к изменению размеров и формы сравнительного элемента;

- вещество покрытия не должно растворяться в воде и впитывать влагу;

- вещество покрытия не должно разлагаться и взаимодействовать с компонентами рудничной атмосферы при температурах до 500°C .

Среди различных веществ, исследованных нами, как вещество наиболее подходящее для чернения сравнительного элемента нами выбран сульфид серебра Ag_2S . Сульфид серебра – химически стойкое вещество черно-серого цвета, практически нерастворимое в воде. Температура его плавления составляет 842°C , коэффициент черноты в интервале температур $360 - 500^{\circ}\text{C}$ близкий к коэффициенту черноты платиновой черни и составляет $0,92 - 0,96$. Ag_2S не обладает каталитической активностью и не приводит к окислению метана на поверхности сравнительного элемента при максимально возможных температурах его разогрева. Сульфид серебра не взаимодействует с компонентами рудничной атмосферы и не изменяет свои характеристики в процессе длительной эксплуатации.

Процесс чернения сравнительного элемента сульфидом серебра осуществляется путем пропитки сравнительного элемента водным раствором нитрата серебра AgNO_3 и последующего его нагрева до температуры $450 - 500^{\circ}\text{C}$. При такой температуре происходит интенсивное разложение нитрата серебра, а образовавшееся серебро активно взаимодействует с серосодержащими газами, присутствующими в воздухе (H_2S , SO_2 и др.), что приводит к появлению на поверхности сравнительного элемента черного сульфида серебра.

Экспериментальные исследования термогрупп с черненными сравнительными элементами показали, что в области высоких температур крутизна вольт-амперной характеристики сравнительного элемента после чернения заметно снижается (см. рис. 5.6), что свидетельствует об увеличении радиационной составляющей теплообмена термоэлемента после чернения.

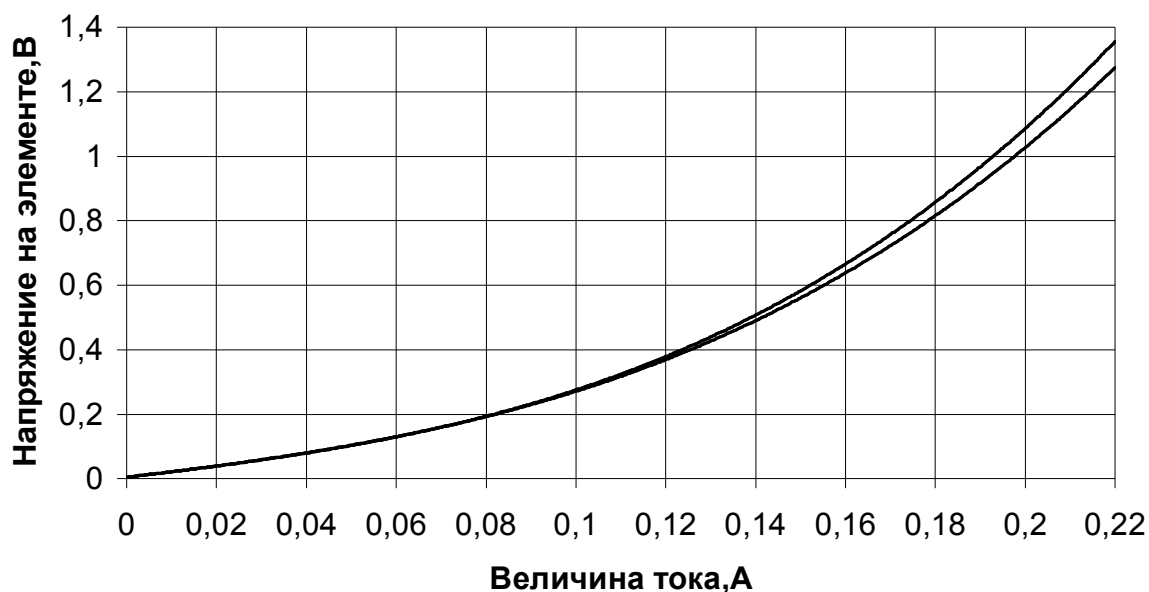


Рис. 5.6. Вольтамперные характеристики сравнительного элемента:
 ◆ - до чернения; ● - после чернения.

Величина смещения вольтамперной характеристики сравнительного элемента после чернения практически совпадает с расчетным смещением характеристики рабочего термоэлемента после покрытия его платино-палладиевым катализатором, приведенным на рис. 2.16. Это позволяет сделать вывод, что предложенное чернение сравнительного элемента сульфидом серебра позволяет не только устранить смещение вольтамперной характеристики сравнительного элемента за счет изменения его окраски в процессе эксплуатации, но и выровнять удельный вес различных механизмов теплообмена для рабочего и сравнительного элементов и обеспечить этим идентичность их характеристик.

Наиболее качественный подбор элементов в термогруппы при массовом производстве при этом может быть осуществлен следующим образом:

- рабочие и черненные сравнительные элементы привариваются к стойкам, укрепленным в полуоснованиях датчиков;
- снимаются вольтамперные характеристики элементов;
- подбираются пары элементов в термогруппы с идентичными характеристиками;
- полуоснования с подобранными парами термоэлементов склеиваются в термогруппы.

Такой подбор наиболее целесообразно осуществлять на специальных компьютеризированных стендах, обеспечивающих автоматическое снятие характеристик элементов и подбор их в пары.

Для подобранных указанным выше образом экспериментальных термогрупп с черненным сравнительным элементом, уход нуля мостовой измерительной схемы при изменении величины тока через термоэлементы на ± 10 мА не превышает 0,5 мВ, а после проведения их термической балансировки снижается до сотых долей милливольт.

5.3. Совершенствование метода измерения и конструкции термокаталитических датчиков

В первых известных термокаталитических датчиках метана, чувствительный элемент состоял из резистивных каталитически активного (рабочего) и компенсационного (сравнительного) элементов. Чувствительный элемент датчика размещался в реакционной камере, которая была ограничена от контролируемой атмосферы фильтрэлементам из многослойной металлической сетки. Способ измерения, реализуемый в этом устройстве, заключался во взаимодействии чувствительного элемента датчика с горючим газом, поступающим к нему через фильтрэлемент за счет диффузии и конвекции. На результаты измерения этим датчиком оказывали значительные изменения скорости газовой воздушного потока, запыленности шахтной атмосферы, пространственного положения датчика. Кроме того, он имел ограниченный диапазон измерения содержания горючих газов и сравнительно низкие значения перегрузочных концентраций горючего газа, длительное воздействие которых не выводит из строя датчик.

В последствии в термокаталитических датчиках метана, в том числе и применяемых в стационарной и переносной аппаратуре контроля метана, термоэлементы стали помещать в реакционную камеру, которая образована внутри пористого керамического или металлокерамического газообменного фильтрэлемента. При этом чувствительный элемент датчика, состоящий из рабочего и сравнительного элементов, приваривался к металлическим стойкам, которые впесовывались в основание датчика из диэлектрика. Между рабочим и сравнительным чувствительным элементом устанавливался теплоизоляционный экран. Другие концы стоек служили для подключения датчика в схему прибора [30].

К недостаткам такого датчика следует отнести сравнительно узкий диапазон измерения содержания горючего газа, обусловленный нелинейностью выходного сигнала датчика при концентрации метана атмосферы свыше 2,5%, значительное влияние запыленности шахтной атмосферы и изменения температуры окружающей среды на результаты измерения, а также сравнительно низкая устойчивость к перегрузкам по метану.

Указанные недостатки, выше описанного датчика, обусловлены тем, что в известных термокаталитических датчиках поток метана Q_m , поступающий в реакционную камеру и окисляющийся на каталитически активном элементе, определяется как [30].

$$Q_m = C_{ma} \gamma_{\varepsilon} \gamma_{\phi} / (\gamma_{\varepsilon} + \gamma_{\phi}) \quad (5.1)$$

где C_{ma} - концентрация метана в атмосфере;

γ_{ϕ} - проводимость фильтра.

Из приведенного выражения видно, что количество окисляющегося метана, а, следовательно, прирост температуры активного элемента, увеличение его сопротивления и связанное с этим выходное напряжение измерительного моста при постоянной концентрации метана зависит от проводимости фильтрэlemen-

та и каталитической активности рабочего элемента, определяющей его эффективную диффузионную проводимость. Изменение этих величин возможно под воздействием колебаний питающего напряжения, температуры, процесса старения чувствительных элементов, засорения фильтрэлемента. В серийно выпускаемых датчиках проводимость фильтрэлемента $\gamma_{\phi} = (4 \div 5)\gamma_{\circ}$. При применении платино-палладиевых катализаторов и γ - окиси алюминия для изготовления чувствительных элементов в существующих датчиках концентрация метана $C_{\text{ма}} = 1\%$ об. вызывает прирост температуры каталитически активного (рабочего) элемента приблизительно на 20°C . Это обеспечивает сравнительно высокую чувствительность датчиков ($20 \div 30$) мВ / %об. CH_4 на выходе измерительного моста, но при сравнительно высоких концентрациях метана (более 2,5% об.) вызывает повышенное старение чувствительного элемента и нелинейность датчика.

Учитывая высокую чувствительность и возможности современной электроники по обработке сравнительно малых потенциальных сигналов эффективным направлением в устранении указанного выше недостатка термогрупп, является снижение потока метана Q_m к чувствительному элементу. Из (5.1) видно, что уменьшение Q_m возможно за счет уменьшения проводимости фильтрэлемента или активности рабочего элемента. Уменьшение проводимости фильтрэлемента возможно за счет снижения его пористости, увеличение толщины фильтрэлемента. Но при этом значительно растет постоянная времени датчика, и увеличиваются погрешности, связанные с засорением фильтрэлемента. Снижение же каталитической активности рабочего элемента снижает общий срок службы датчика, для обеспечения которого катализатор на рабочий элемент наносят в избытке с тем, чтобы скорость горения метана на катализаторе зависела в основном только от скорости подвода газа к поверхности рабочего элемента (от его эффективной диффузионной проводимости).

При указанном соотношении проводимостей фильтрэлемента и эффективной диффузионной проводимости термоэлемента ($\gamma_{\phi} = (4 \div 5)\gamma_{\circ}$), изменения последней значительно влияют на поток метана Q_m и, следовательно на выходное напряжение датчика. Как показали выполненные нами теоретические и экспериментальные исследования процесса окисления метана в термокаталитических датчиках, результаты которых приведены в предыдущем разделе, на величину γ_{\circ} оказывают существенное влияние величина тока, протекающего через термоэлементы, и температура окружающей среды.

Так, значение γ_{\circ} , экспериментально определенное исходя из скорости выгорания метана в камере, практически линейно зависит от тока и для датчика стационарной аппаратуры в диапазоне его значений от 180 до 220 мА может быть аппроксимировано зависимостью

$$\gamma_{\circ} = (0,013I_{mz} - 1,6)\gamma_{\circ 200}, \quad (5.2)$$

где $\gamma_{\circ 200}$ - диффузионная проводимость элемента при токе 200 мА;

I_{mz} - ток через термоэлемент в мА.

В таком случае, при постоянной проводимости фильрэлемента, поток метана Q_m , а, следовательно и выходное напряжение измерительного моста, при постоянной концентрации метана линейно возрастают при увеличении тока через термоэлементы или росте температуры окружающей среды. Однако, как показали наши исследования, между изменением Q_m и выходным напряжением измерительного моста нет прямой зависимости. Это объясняется тем, что не все тепло, образующееся при окислении метана, расходуется на нагрев рабочего элемента, причем с увеличением тока доля тепла расходуемого на нагрев элемента снижается и только при малом токе и низкой температуре рабочего элемента, когда окисление происходит в кинетической области, практически все тепло расходуется на нагрев элемента.

Указанные особенности протекания реакции обуславливают нелинейный характер зависимости выходного напряжения датчика от величины тока при $C_m = const$. На рис. 5.7 приведена экспериментально снятая нами зависимость выходного напряжения от тока при $C = 1,02$ об.% для серийной термогруппы.

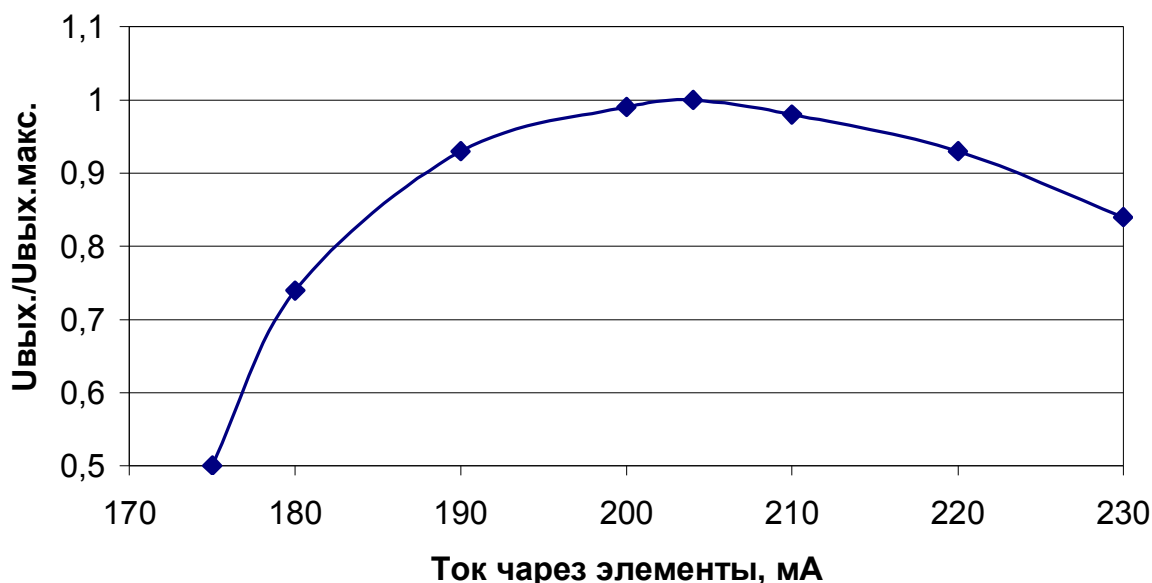


Рис. 5.7. Выходное напряжение датчика при $C = 1,02$ об.% и различном токе через термоэлементы.

Из приведенного рисунка видно, что при токе через элементы в диапазоне 180 – 190 мА (характерного для номинального режима работы термогруппы) выходной сигнал измерительного моста существенно зависит от режима питания термогруппы, и, следовательно, от изменения параметров среды влияющих на температуру разогрева термоэлементов (температуры, газового состава и др.). Максимум чувствительности термогруппы наблюдается при токах 200 – 210 мА. В этом же диапазоне токов выходной сигнал практически не зависит от изменения режима питания термогруппы, и параметров среды.

Экстремум зависимости на рис. 5.7 соответствует току 203 мА и начальной температуре разогрева элементов около 420°C . С точки зрения минимиза-

ции влияния неконтролируемых факторов на результаты измерения такой режим питания термогруппы является наиболее предпочтительным. Однако в реальных условиях увеличение тока через элементы до 200 – 210 мА из-за увеличения потребляемой мощности, повышенного старения элементов при высоких температурах и их перегрева при высоких концентрациях метана, нецелесообразно. Более предпочтительным является поиск решений, которые позволили бы сдвинуть максимум приведенной зависимости в область более низких температур.

Характерным является то, что при экспериментальных исследованиях серийно выпускаемых термогрупп без диффузионного фильтра (см. разд.4), максимум чувствительности термогруппы наблюдался при токе около 215 мА. Это указывает на возможность управления рассмотренной характеристикой термогруппы путем подбора сопротивления фильтроэлемента. Оптимальным вариантом при этом является использование фильтроэлемента большой проводимости и введение в датчик дополнительного диффузионного сопротивления со стабильными параметрами, обеспечивающего снижение величины потока метана и смещение максимума чувствительности термогруппы в сторону более низких токов через термоэлементы.

Поэтому, для реализации режима работы с сильным ограничением диффузии нами предложена термогруппа с двойным диффузионным фильтром, приведенная на рис. 5.8. Отличие ее от серийных термогрупп заключается в том, что металлокерамический фильтр выполнен с несколько увеличенными размерами, а внутрь его введен дополнительный фильтр, выполненный в виде полого металлического стакана с калиброванным отверстием, причем отверстие выполнено таким, чтобы его диффузионная проводимость $\gamma_{отв} \ll \gamma_{\phi}$. В этом случае суммарное диффузионное сопротивление определяется $\gamma_{отв}$, а внешний фильтр выполняет только функции защиты при работе в загрязненной среде, причем загрязнение этого фильтра практически не влияет на суммарное диффузионное сопротивление. Кроме того, при обеспечении высокой точности изготовления стакана и отверстия, обеспечивается постоянство диффузионного сопротивления всех термогрупп и равенство выходных напряжений измерительного моста.

Диффузионное сопротивление отверстия длиной l и сечением S в металлическом стакане определим, исходя из первого закона Фика, согласно которому в стационарном случае /101/

$$Q_m = -D_m \frac{\alpha C_m}{\alpha l} S, \quad (5.3)$$

где D_m – коэффициент диффузии метана в воздухе, m^2/c .

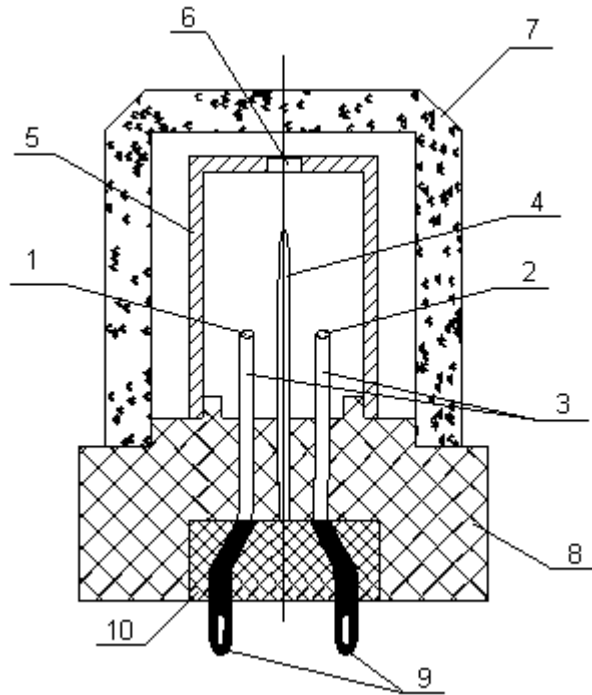


Рис. 5.8. Термогруппа с двойным диффузионным фильтром: 1, 2 – рабочий и компенсационный элементы; 3 – держатели; 4 – перегородка; 5 – стакан; 6 – калиброванное отверстие; 7 – металлокерамический фильтр; 8 – диэлектрическое основание; 10 – компаунд.

Приняв

$$\frac{\alpha C_m}{\alpha l} = \frac{C_{ма} - C_{мк}}{l},$$

имеем

$$Q_m = -D_m \frac{S}{l} (C_{ма} - C_{мк}). \quad (5.4)$$

Таким образом

$$\gamma_\phi = D_m \frac{S}{l}.$$

Считая, что коэффициент диффузии при постоянном давлении определяется по формуле Сутерланда, имеем

$$D_m = D_{мо} \left(\frac{t_{cp} + 273}{273} \right)^{1,75}, \quad (5.5)$$

где $D_{мо}$ – значение D_m при 0°C ;

t_{cp} – средняя температура газа в отверстии, которую, учитывая высокую теплопроводность металлического стакана и низкую теплопроводность металлокерамического фильтра, можно принять равной t_2 внутри реакционной камеры.

В таком случае

$$\gamma_{\phi} = D_{mo} \left(\frac{t_r + 273}{273} \right)^{1,75} \frac{S}{l} \quad (5.6)$$

Как видно, зависимость γ_{ϕ} обратная температурной зависимости объемной теплотворной способности метана $Q_{mn} = Q_{mno} \left(\frac{273}{273 + t_r} \right)$ и зависимости от температуры коэффициента ϵ_2 в уравнении (4.39). Расчеты показывают, что произведение

$$\epsilon_3 = \epsilon_2 \left(\frac{t_r + 273}{273} \right)^{0,75}$$

практически не зависит от температуры (при $t_r=30^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_3=267$; при $t_r=70^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_3=268,8$ для серийных термогрупп с $d_{\text{тр}}=30$ мкм). В таком случае выходное напряжение моста определяется исключительно размерами калиброванного отверстия и не зависит от температуры окружающей среды и давления

$$U_{\text{вых}} = \epsilon_3 \beta Q_{mno} C_{ma} D_{mo} \frac{S}{l}. \quad (5.7)$$

Независимость от давления при измерении объемной концентрации газа, объясняется обратным характером связи D_{mo} и массовой концентрации C_{ma} от давления.

Независимость от давления при измерении объемной концентрации газа, объясняется обратным характером связи D_{mo} и массовой концентрации C_{ma} от давления.

Реально, из-за значительного снижения выходного напряжения, обеспечить выполнение условия $\gamma_{\phi} \ll \gamma$, невозможно, так как при этом возникают дополнительные погрешности измерения из-за нестабильности измерительных цепей преобразователей и погрешности связанные с изменением пространственного расположения датчика. Экспериментальная проверка показала, что при применении серийных датчиков (после их термической балансировки) для обеспечения погрешности измерения 0,2% об. допустимо соотношение $\gamma_{\text{отв}}=0,1\gamma$. При этом величина выходного напряжения составляет $\approx 4\text{мВ}/\% \text{CH}_4$. В этом случае при определении величины выходного напряжения необходимо учитывать снижение диффузионного потока, вызванное наличием метана в реакционной камере. С учетом этого

$$U_{\text{вых}} = \epsilon_3 K_m \beta Q_{mn} C_{ma} D_{mo} \frac{S}{l}. \quad (5.8)$$

Наличие K_m в выражении указывает на некоторую зависимость $U_{\text{вых}}$ от активности рабочего элемента, однако, зависимость эта несущественна.

Так, например, при изменении тока $I_{mг}$ от 180 до 210 мА, что приводит к изменению γ_3 от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1,53 \cdot 10^{-7}$, с учетом роста t_r в камере, выходное напряжение изменяется на 3,7%.

Экспериментальная проверка работы термогруппы с сильным ограничением диффузии показала хорошее совпадение экспериментальных результатов

с расчетными. Так, например, при размерах калиброванного отверстия $\alpha=0,85$ мм и $l=0,5$ мм при концентрации метана 1% ($C_{\text{ма}}=0,007168$ кг/м³) и токе $I=190$ мА теоретически получен результат $U_{\text{вых}}=6,3$ мВ при этих же условиях.

Некоторые результаты экспериментальных исследований термогруппы, выполненных при $C_{\text{м}}=1,03\%$ об. приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Экспериментальные исследования термогруппы
при различном ограничении диффузии

$I_{\text{мг}}$, мА	$U_{\text{вых}}$ (мВ) при ограничении диффузии					
	без фильтра	С керам. фильтром	Слабое огран.	Сильное ограничение		
				$l=0,5$ мм $\alpha=1,0$ мм	$l=0,5$ мм $\alpha=0,85$ мм	$l=0,5$ мм $\alpha=0,6$ мм
170	3	3	3	2,8	2,8	2,8
180	25	18	13	8,0	6,3	3,2
190	34	26	15	8,6	6,3	3,2
200	38	30	17	8,6	6,3	3,2
210	39	31	17	8,6	6,0	3,0
220	38	30	16	7,2	4,0	2,0

Важной особенностью работы термогруппы при сильном ограничении диффузии является смещение рабочего участка характеристики в область меньших токов. Это дает возможность питать термогруппу меньшим током, снизить потребляемую мощность и температуру предварительного разогрева, что в свою очередь, увеличивает стабильность и продолжительность ее работы. На рис. 5.9 приведены характеристики термогруппы без ограничения диффузии и при размерах калиброванного отверстия $l=0,5$ мм, $d=0,85$ мм нормированные к величине выходного напряжения при $I_{\text{мг}}=200$ мА. Как видно из рисунка, характеристика при сильном ограничении диффузии имеет значительный горизонтальный участок сдвинутый в область малых токов, что выгодно отличает ее от характеристики без дополнительного сопротивления. Оптимальным значением $I_{\text{мг}}$ в этом случае можно считать $I_{\text{мг}}=185$ мА. При меньших значениях $I_{\text{мг}}$ возможен уход с горизонтального участка при низких t_r и снижении активности термогруппы. Температура предварительного нагрева термогруппы в этом случае составляет 370°C.

Одним из недостатков серийно выпускаемых термогрупп является нарушение линейности выходной характеристики при концентрации свыше 3% кроме того, возможен быстрый выход со строя термогруппы при концентрациях свыше 5%, обусловленный значительным перегревом рабочего элемента. При сильном ограничении диффузии концентрация метана в реакционной камере в 5-10 раз ниже концентрации метана без ограничения диффузии. В этом случае измерительный мост является линейным во всем диапазоне измеряемых концентраций и невозможен перегрев и выход со строя рабочего элемента.

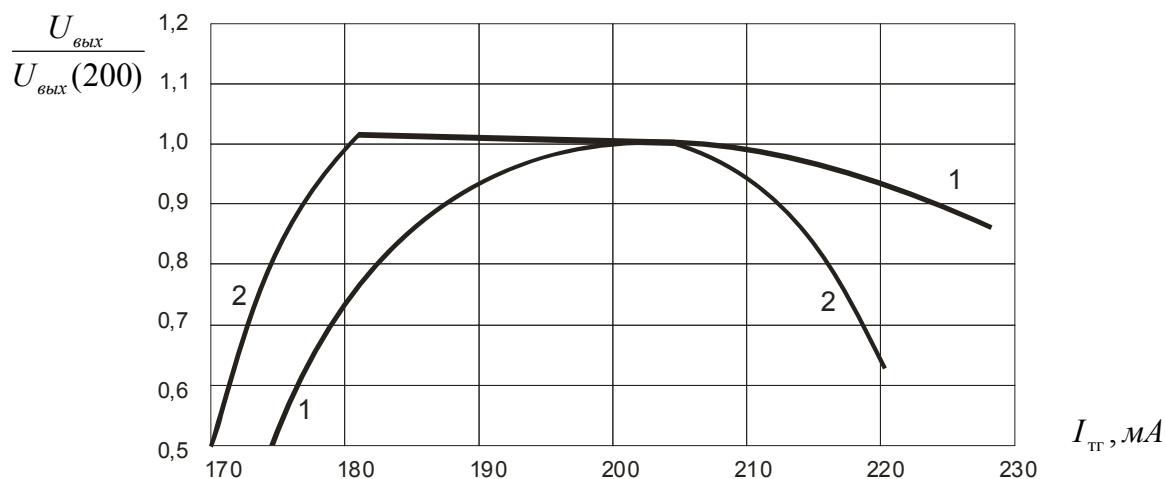


Рис. 5.9. Нормированные характеристики термогруппы при различном ограничении диффузии. (1 – без дополнительного фильтра; 2 – с калиброванным отверстием) $\alpha=0,85$ мм; $l=0,6$ мм.

Согласно уравнению (5.8) выходное напряжение датчика при сильном ограничении диффузии линейно связано с концентрацией во всем диапазоне ее изменений. Уравнение получено при условии, что лимитирующим агентом является метан, однако, при больших концентрациях метана лимитирующим агентом становится кислород, что приводит к снижению выходного напряжения. Условия, при которых лимитирующим агентом является метан, а кислород находится в реакционной камере в избытке, можно записать в виде

$$2C_M D_{Mo} > C_K D_{Ko} \quad (5.9)$$

где C_K и D_{Ko} – соответственно концентрация и коэффициент диффузии кислорода в воздухе.

С учетом стехиометрического состава существующих смесей метана с воздухом выполнение условия наблюдается до концентрации $C_M=9\%$, при больших концентрациях горение осуществляется уже при недостатке O_2 . Поэтому до концентрации $C_M=9\%$ следует ожидать роста выходного напряжения. Что касается линейности выходной характеристики, то, по-видимому, возможно нарушение ее при более низких концентрациях, так как по мере приближения к 9% значительного избытка O_2 в камере не наблюдается, что должно приводить к некоторому снижению выходного напряжения по сравнению с расчетным.

Экспериментально снятые выходные характеристики подтверждают выше изложенное. Как видно из рис. 5.9, выходная характеристика датчика с двойным диффузионным фильтром, снятая при $I_{me}=180$ мА ($l=0,5$ мм, $d=0,85$ мм) сохраняет линейность до $C_M=5,5\%$ об, максимум выходного напряжения наблюдается при $C_M=9\%$, а затем наблюдается снижение выходного напряжения.

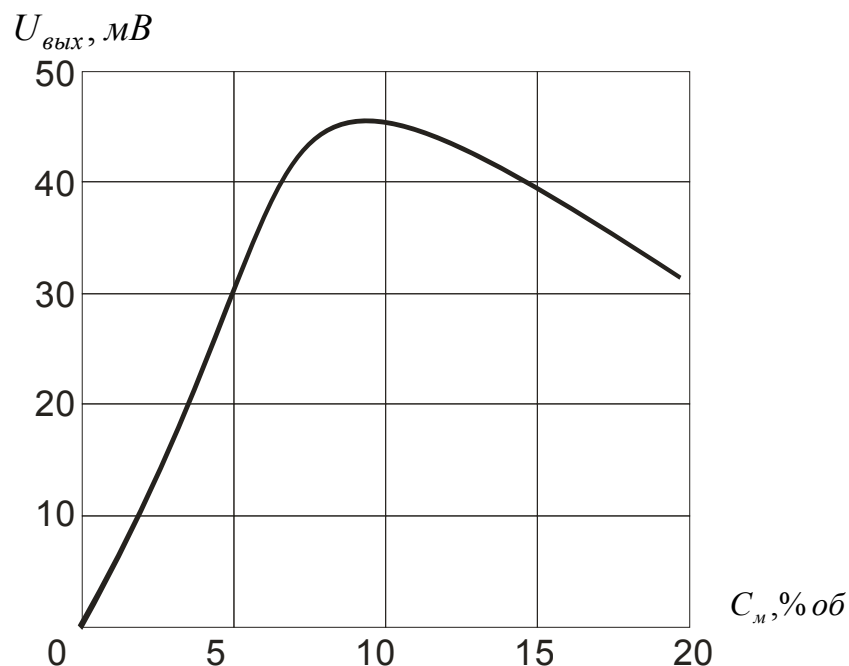


Рис. 5.9. Выходная характеристика измерительного моста при сильном ограничении диффузии.

Высокое выходное напряжение моста, исключающее возможность неоднозначной работы защиты, сохраняется до концентраций $C_m=70\%$. Для обеспечения однозначности срабатывания защиты при больших концентрациях метана целесообразно использовать явление резкого изменения теплопроводности среды при высоких концентрациях метана.

На рис. 5.10 приведена зависимость напряжения на компенсационном элементе и кривая содержания метана в реакционной камере, полученная расчетным путем на основании первой зависимости. Кривые получены при $I_{m2}=180мА$. Как видно из рисунка, при переходе к высоким концентрациям $СН_4$ наблюдается резкое снижение напряжения на компенсационном элементе, вызванное ростом концентрации метана в камере и увеличением теплопроводности среды.

Ввиду того, что изменение напряжения на компенсационном элементе вызванное ростом содержания метана по порядку величин сопоставимо с изменениями, вызванными возможными колебаниями температуры (при изменении t_r на $40^{\circ}С$ напряжение изменяется на величину $\approx 50мВ$) регулировка схем, обеспечивающих однозначность срабатывания защиты, должна осуществляться в условиях эксплуатации или изменения температуры окружающей среды должны компенсироваться соответствующим изменением тока I_{m2} , обеспечивающим стабильный разогрев элементов. Последнее можно осуществить, используя в качестве датчика тока резистор из платины. Сопротивление резистора должно быть минимально возможным и выбираться, исходя из температурных характеристик используемых ОУ. При применении ОУ общего назначения целесообразно выбирать его в диапазоне $0,1-0,5 Ом$.

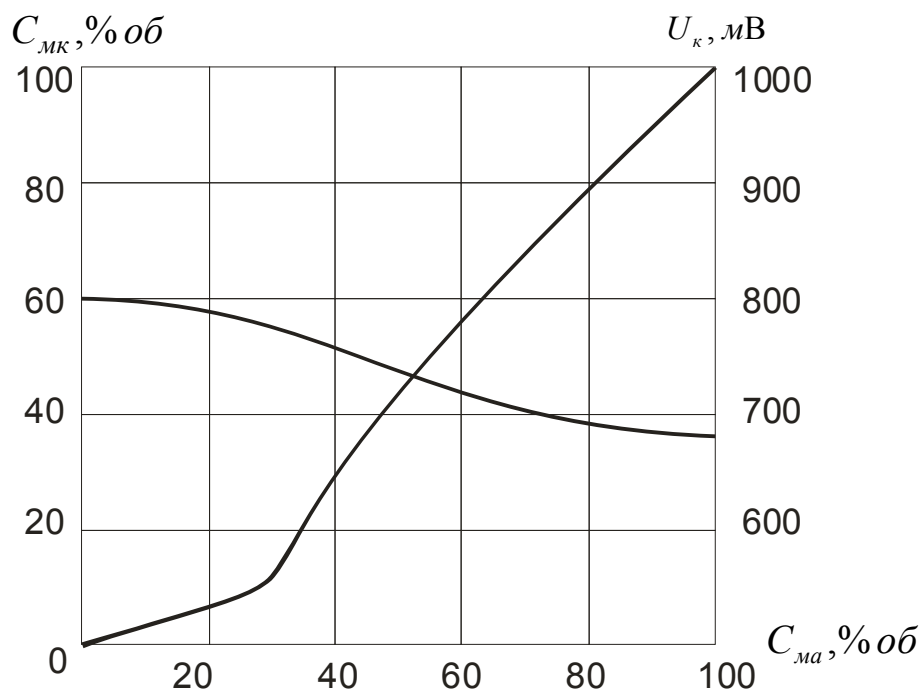


Рис. 5.10. Содержание метана в реакционной камере (1) и напряжение на компенсационном элементе (2) при $I_{mz}=180$ мА.

Выполнение термокаталитических датчиков, обеспечивающих режим работы с сильным ограничением диффузии, зависит от конкретных условий эксплуатации. Некоторые варианты выполнения рассмотрены нами в предложенном способе измерения содержания горючего газа в шахтной атмосфере и устройстве для его осуществления [91]. Сущность способа измерения состоит в том, что чувствительный элемент датчика помещают в дополнительную камеру внутри объема, ограниченного от атмосферы фильтрэlementом. Смесь воздуха с горючим газом из контролируемой атмосферы поступает сначала через фильтрэlement в промежуточный объем, образованный фильтрэlementом и внешней поверхностью дополнительной камеры, а из промежуточного объема через калиброванное отверстие в дополнительной камере за счет диффузии смесь воздуха с горючим газом поступает к чувствительному элементу датчика.

Конструкция одного из вариантов датчиков, установленного в корпусе изделия приведена на рис 5.11. Другой вариант выполнения датчика, предназначенного для стационарной аппаратуры контроля содержания метана, приведен на рис 5.12.

Датчик в сборе включает основание с проходящими через него металлическими стойками, с одной стороны которых подсоединен чувствительный элемент датчика, вторые концы служат для подключения датчика в схему прибора. Чувствительный элемент датчика размещается в дополнительной камере, выполненной в виде газонепроницаемого стакана с отверстием в стенке, причем газонепроницаемый стакан расположен внутри объема ограниченного от контролируемой атмосферы фильтрэlementом, установленным с зазором от внешней поверхности газонепроницаемого стакана. Датчик устанавливается в

полости, образованной в корпусе изделия, на втулке из диэлектрика с отверстиями. Между основанием датчика и втулкой устанавливается амортизатор, например, из резины. Вторые концы стоек, пропускаются через отверстия во втулке. Втулка устанавливается на дно полости. В верхней части полости устанавливается фильтрэлемент в кассете. Таким образом, полость по функциональному назначению является промежуточным объемом, в который через фильтрэлемент, очищаясь от пыли, попадает газовоздушная смесь из контролируемой атмосферы к чувствительному элементу датчика. Между рабочим и сравнительными элементами размещается экран, исключающий попадание теплового потока с одного элемента на другой, например, при изменении пространственного положения устройства.

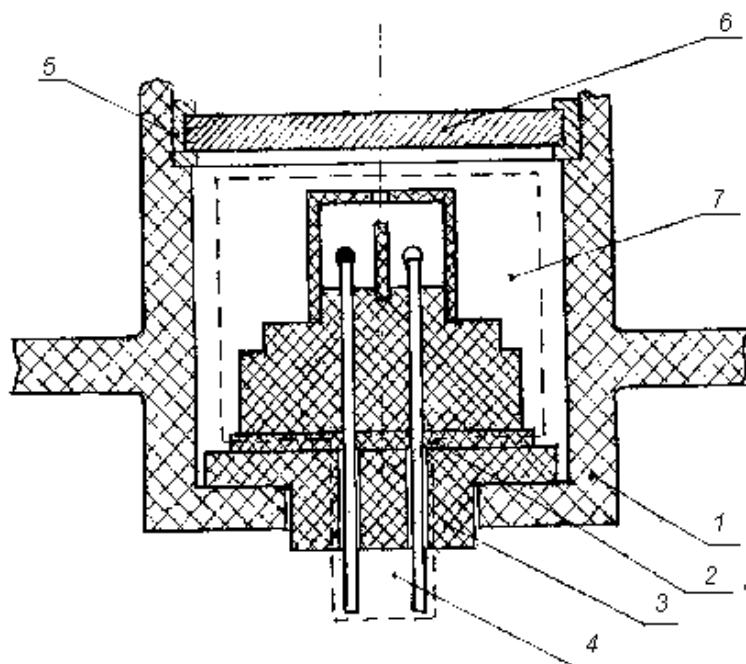


Рис. 5.11. Конструкция датчика с дополнительным газодиффузионным фильтром смонтированного в корпусе изделия: 1 – корпус изделия; 2 – амортизатор; 3 - втулка; 4 – датчик в сборе; 5 – кассета; 6 – фильтрэлемент; 7 – полость.

Устройство, приведенное на рис. 5.12 содержит, чувствительный элемент датчика, состоящий из каталитически активного рабочего и сравнительного элементов, приваренных к стойкам, запрессованным в основании 5 из диэлектрика.

Между рабочим и сравнительными элементами устанавливается экран 7, предотвращающий взаимовлияние тепловых потоков чувствительных элементов друг на друга. Элементы стойки и экран размещены в реакционной камере, образованной полым стаканом, с калиброванным отверстием. Стакан закреплен на основании, например, механически или с помощью клея. С зазором от внешней стенки стакана устанавливается фильтрэлемент, который также закрепляется на основании с помощью клея или механически. Между внутренней поверхностью фильтрэлемента и газонепроницаемым стаканом сформирован проме-

жуточный объем, куда через фильтрэлемент поступает газоздушная смесь из контролируемой атмосферы.

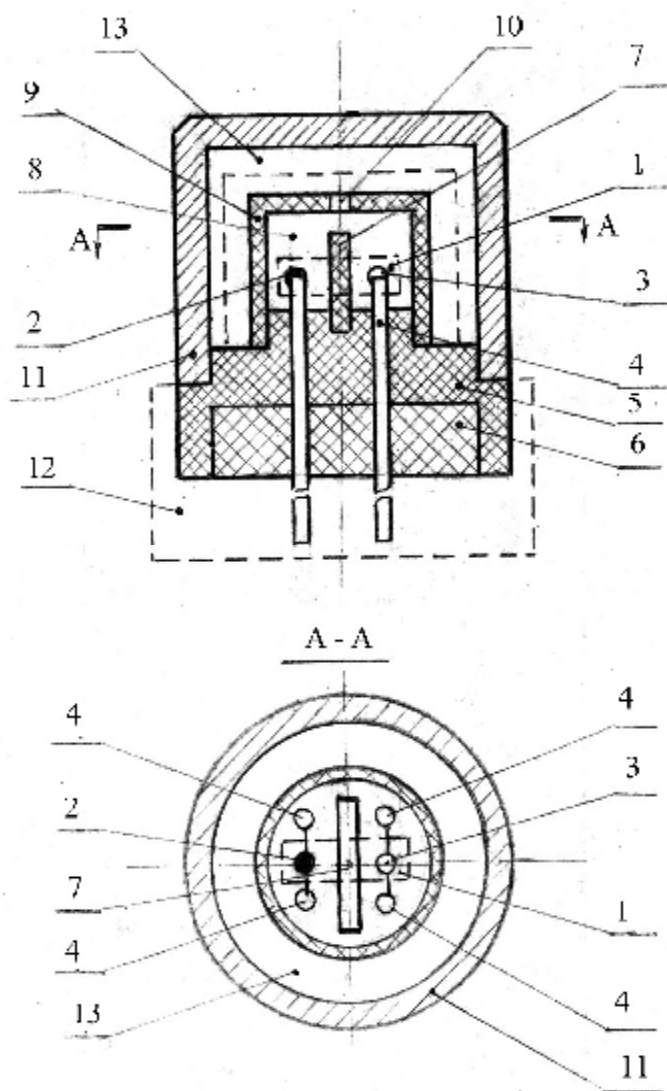


Рис. 5.12. Конструкция датчика с дополнительным газодиффузионным фильтром, предназначенного для стационарной аппаратуры контроля содержания метана: 1 – чувствительный элемент; 2, 3 - каталитически активный и сравнительный элементы; 4 – стойки; 5 – основание; 6 – эпоксидный компаунд; 7 – экран; 8 - реакционная камера; 9 - полый стакан; 10 – калиброванное отверстие; 11 – фильтрэлемент; 13 - промежуточный объем.

Выполнение реакционной камеры в виде полого цилиндра с отверстием при обеспечении проводимости отверстия $\gamma_{отв}$ существенно меньшей проводимости фильтрэлемента γ_{ϕ} , т.е. при соблюдении условия

$$\gamma_{отв} \ll \gamma_{\phi} \quad (5.10)$$

приводит к тому, что количество горючего газа, подводимого к чувствительным элементам, определяется только диаметром и высотой отверстия. Это обеспечивает уменьшение влияния запыленности фильтрэлемента и скорости метано-воздушной смеси на результаты измерения. Указанное объясняется тем, что при соблюдении условия (5.10) в промежуточном объеме содержание мета-

на практически равно содержанию метана в атмосфере $C_{ма}$ и значительно меньше зависит от запыленности фильтрэлемента и скорости МВС. При этом поступление МВС из дополнительного объема через отверстие к элементам меньше ее поступления через фильтрэлемент из атмосферы.

В серийных датчиках, поток метана поступающего к термоэлементам Q_m зависит не только от его содержания в атмосфере, но частично от скорости воздушного потока. Поток метана из промежуточного объема, попадающий в реакционную камеру, практически не зависит от скорости воздушного потока, что уменьшает влияние этого фактора на погрешность измерения по сравнению с серийными датчиками. При соблюдении условия (5.10) уменьшается также влияние на результаты измерения запыленности фильтрэлемента, поскольку поток метана, поступающий в этом случае к термоэлементам, зависит в основном от $\gamma_{омв}$. Это следует также из анализа зависимости потока метана Q_m к термоэлементу при применении дополнительного диффузионного сопротивления

$$Q_m = C_{ма} \gamma_{э} \gamma_{ф} \gamma_{омв} / (\gamma_{ф} \gamma_{э} + \gamma_{э} \gamma_{омв} + \gamma_{ф} \gamma_{омв}) \quad (5.11)$$

При выборе $\gamma_{омв} \ll \gamma_{ф}$ и $\gamma_{омв} \ll \gamma_{э}$ поток метана, окисляющегося на рабочем элементе, практически определяется диффузионным сопротивлением отверстия $Q_m = C_{ма} \gamma_{омв}$ и не зависит от изменения параметров фильтрэлемента в процессе эксплуатации (например, засорения пылью) и изменения эффективной диффузионной проводимости термоэлемента. Изменяя проводимость отверстия можно менять соотношение между содержанием метана в атмосфере и реакционной камере, при этом с уменьшением $\gamma_{омв}$ уменьшается содержание метана в камере, что при прочих равных условиях обеспечивает расширение диапазона измерения устройства и устойчивость к газовым перегрузкам.

Следует отметить, что чрезмерное уменьшение $\gamma_{омв}$ приводит к существенному снижению выходного напряжения измерительного моста, что может привести к увеличению погрешностей измерения обусловленных нестабильностью нулевых показаний. Экспериментальная проверка предложенных способа и устройства позволили установить, что для измерения содержания метана в диапазоне от 0 до 7 %об. наиболее предпочтительным является следующее соотношение проводимостей:

$$\gamma_{э} = (2 - 6) \gamma_{омв} \quad (5.12)$$

В этом случае выходное напряжение измерительного моста находится в пределах 10–4 мВ/%об. и при этом сохраняется постоянная времени датчика не более 15 с.

Как было указано ранее, введение дополнительного диффузионного сопротивления качественно изменяет характер зависимости выходного напряжения датчика от величины тока при $C_m = const$. На рис. 5.13 приведены зависимости выходного напряжения от тока при $C = 1,02$ об.% экспериментально снятые для термогрупп при различном дополнительном диффузионном сопротивлении.

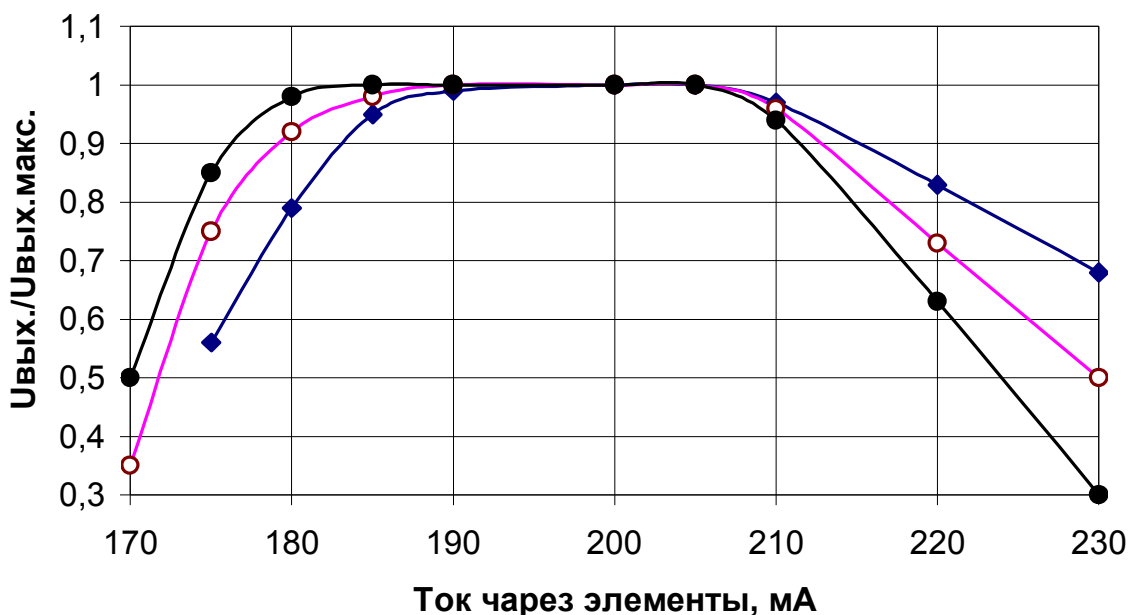


Рис. 5.13. Характеристики датчика с дополнительным диффузионным сопротивлением ($C=1,02$ об.%): \blacklozenge - $\gamma_{\text{э}} = 2\gamma_{\text{отв}}$; \bullet - $\gamma_{\text{э}} = 4\gamma_{\text{отв}}$; \circ - $\gamma_{\text{э}} = 6\gamma_{\text{отв}}$

Как видно из рис. 5.13 введение дополнительного диффузионного сопротивления смещает максимум характеристики в область меньших значений токов. Причем качественно меняется и характер зависимости – в значительном диапазоне токов выходное напряжение остается практически постоянным (плато характеристики). Так при $\gamma_{\text{э}} = 6\gamma_{\text{отв}}$ выходное напряжение достигает своего максимума при токе 183 мА и сохраняется практически неизменным до тока 200 мА. Такой характер поведения кривых объясняется проявлением автостабилизационных свойств у датчика: с одной стороны при росте тока увеличивается $\gamma_{\text{э}}$, что приводит к снижению концентрации метана под газопроницаемым стаканом и, следовательно, увеличению разности концентраций метана и величины его диффузионного потока через калиброванное отверстие, а с другой - при росте тока и увеличении температуры элемента снижается часть тепла, образующегося в результате окисления метана, расходуемая на нагрев термоэлемента.

Таким образом, предложенные способ измерения и конструкции датчиков позволяют расширить диапазон измерения, уменьшить влияние нестабильности питания, температуры, скорости метановоздушной смеси и запыленности фильтрэлемента на погрешность измерения, обеспечить сохранение работоспособности датчика при повышенном содержании горючего газа в контролируемой атмосфере. Следует отметить, что при введении дополнительного газодиффузионного сопротивления и номинальном режиме работы термогруппы

концентрация метана в реакционной камере в несколько раз меньше концентрации метана в атмосфере. Это открывает новые перспективы для автоматической диагностики средств контроля концентрации метана и выявления несанкционированного вмешательства в их работу, путем кратковременного снижения напряжения на термогруппе и последующего наблюдения переходного процесса при переходе к номинальному напряжению питания.

5.4. Разработка методов и средств, обеспечивающих однозначность контроля содержания метана

Известные отечественные и зарубежные системы контроля содержания метана [30] не обеспечивают выполнения требований ГОСТ относительно обеспечения однозначности срабатывания защиты при высоких концентрациях метана [54].

Так стационарная аппаратура контроля метана в горных выработках [92], состоящая из аппарата сигнализации АС на одну или три точки контроля, преобразователей параметров измерительных ППИ и выносных датчиков метана ДМВ, выпускаемая длительное время НПО «Красный металлист» не обеспечивает однозначности срабатывания защиты при концентрациях метана свыше 40 об.%. Этот недостаток может привести к подаче напряжения на отключенное электрооборудование при наличии условий для образования взрывоопасных смесей, в частности при ведении аварийно-спасательных работ в шахтах [1]. Кроме того, обнаруженное нами явление провала выходной характеристики термокаталитических датчиков в области взрывных концентраций, способно повлечь за собой включение оборудования при внезапном загазировании горных выработок.

Указанный недостаток был частично устранен в предложенном детекторе горючего газа, в основном метана [50], который содержит две мостовые измерительные схемы. Первая мостовая схема, включала каталитическую нить и компенсирующую нить, контактирующие с детектируемым газом. Компенсирующая нить одновременно являлась частью второй мостовой схемы, где выполняла роль чувствительного элемента второго моста. Вторая мостовая схема содержала также нить, защищенную от детектируемого газа, являющейся компенсирующим элементом второго моста. Детектор содержит также средства для коммутации питания обеих мостовых схем в зависимости от концентрации детектируемого газа.

В указанном детекторе горючего газа при повышении содержания горючего газа выше определенного уровня первая мостовая схема, содержащая чувствительный термокаталитический элемент, отключалась и включалась вторая мостовая схема, работающая на кондуктометрическом принципе. При этом компенсирующая нить второй мостовой схемы, отключенная и холодная в исходном состоянии, начинала разогреваться, и измерение вторым мостом было возможно только после окончания переходного процесса, связанного с разогревом компенсирующей нити. В это время отсутствует измерение содержания метана, что снижает надежность газовой защиты. Кроме того, чувствительный

элемент второй мостовой схемы, находящийся практически постоянно в разогретом состоянии, подвергается старению, а закрытый компенсационный элемент этой схемы находится постоянно в холодном состоянии и не подвержен старению, что способствует уходу нуля кондуктометрического датчика в процессе эксплуатации и может привести к значительным ошибкам при измерениях.

Такая же неоднозначность измерений в указанном детекторе возникает при обратном переходе – от измерения высоких концентраций к измерению низких, что связано с переходными процессами, вызванными разогревом каталитически активного рабочего элемента первой мостовой схемы.

Устранение указанных выше недостатков детектора горючих газов, при сохранении и расширении функциональных возможностей существующей стационарной аппаратуры контроля метана в горных выработках, возможно при введении в измерительную схему двух, постоянно включенных измерительных схем. Одна из схем работает на термокаталитическом принципе и предназначена для измерения низких концентраций метана, а другая – термокондуктометрическом принципе и предназначена для измерения высоких концентраций метана. Такой принцип реализован нами при модернизации стационарных анализаторов метана, выполненной с целью обеспечения выполнения требований ГОСТ относительно однозначности измерения и срабатывания защиты. Структурная схема системы контроля с однозначным анализатором метана приведена на рис 5.14.

Система контроля содержания метана в шахтной атмосфере содержит аппарат сигнализации 1, преобразователь параметров измерительный 2, который содержит измерительные схемы для контроля малых концентраций (измерительный мост 14, усилитель 6 и активный выпрямитель 7) и высоких концентраций (измерительный мост 5, усилитель 19, активный выпрямитель 20 и линейризатор 21), а также блоки для управления режимами работы измерителя (компараторы 11, 16, 17, 18, пороговые устройства 8, 12, 14, 22, реле времени 15) устройства формирования сигналов телесигнализации 9, устройства световой сигнализации 10, устройства индикации 23, блока питания 3.

Введение измерительной схемы высоких концентраций обеспечивает измерение концентрации горючего газа от 0 до 100 % об. доли кондуктометрическим методом измерения. Пороговые устройства позволяют получить управляющие сигналы при достижении концентрации горючего газа четырех пороговых значений (например, 1, 2, 5 и 10 об.%) и с помощью этих сигналов воздействовать на коммутаторы.

Первый коммутатор 11 позволяет в ручном режиме воздействовать на измерительную схему низких концентраций, вводя искусственный разбаланс в мостовую схему, что позволяет в ручном режиме сделать контрольную проверку работы схемы и проверить или настроить баланс второй измерительной схемы высоких концентраций.

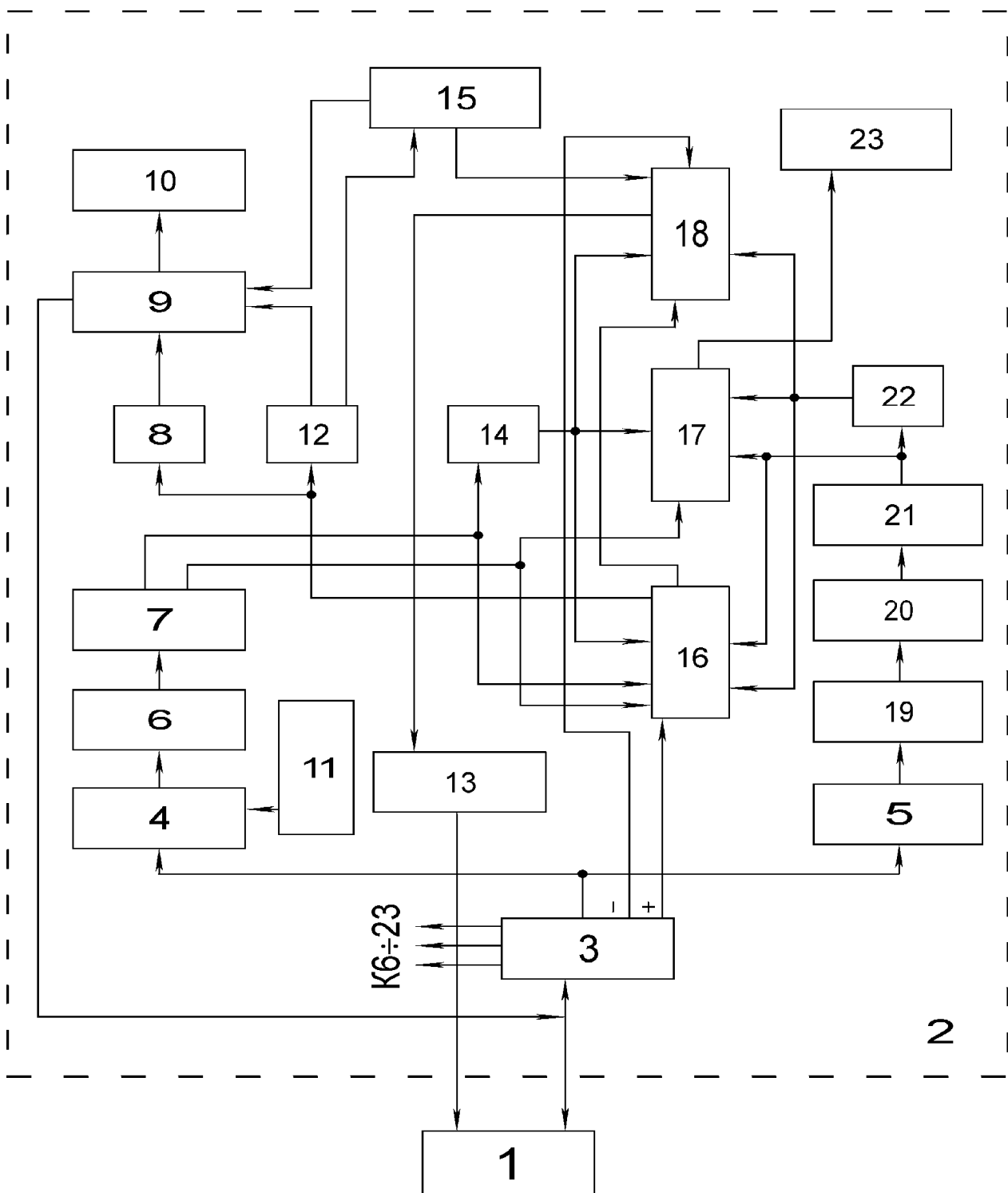


Рис. 5.14. Структурная схема системы контроля с однозначным анализатором метана

Второй коммутатор 16 позволяет под воздействием управляющих сигналов с пороговых устройств при концентрации горючего газа свыше 5 об.% заблокировать работу защиты и переключить сигнал на вход телеметрического усилителя с измерительной схемы низких концентраций на сигнал с измерительной схемы высоких концентраций, причем сигнал с измерительной схемы низких концентраций является постоянным, а сигнал с измерительной схемы

высоких концентраций — прерывистым, с интервалом, который задает реле времени, например, 8 с пропускается сигнал с измерительной схемы высоких концентраций, а 8 с пропускается сигнал нулевого уровня. Это позволит осуществлять контроль за содержанием высоких концентраций горючего газа с поверхности шахты по тем же каналам передачи телеинформации и по тем же измерительным приборам, которые контролируют низкие концентрации горючего газа.

Третий коммутатор 17 позволяет на входе устройства индикации переключить сигнал с измерительной схемы низких концентраций на сигнал с измерительной схемы высоких концентраций под воздействием управляющих сигналов с пороговых устройств. Это позволяет визуально наблюдать за содержанием в атмосфере горючего газа высоких концентраций.

Параллельное включение и непрерывная работа обеих схем в режиме измерения позволяет до минимума снизить время переходного процесса при коммутациях во время переключения с одного режима на другой и тем самым обеспечит надежность однозначного измерения содержания горючего газа в атмосфере в диапазоне от 0 до 100 % объемной доли горючего газа. Таким образом достигается однозначность показаний в диапазоне от 0 до 100 % объемной доли горючих газов, сохранение и расширение функциональных возможностей аппаратуры контроля содержания метана в горных выработках.

Для работы схемы можно выделить следующие характерные режимы, соответствующие определенному содержанию горючего газа в атмосфере:

- отсутствие горючего газа в атмосфере;
- содержание горючего газа в атмосфере ниже первого порогового значения (например, ниже 1 об.%);
- содержание горючего газа в атмосфере выше первого порогового значения, но ниже второго порогового значения (например, выше 1 об.%, но ниже 1,3 об.%);
- содержание горючего газа выше второго порогового значения, но ниже третьего заданного порогового значения (например, выше 1,3 об.%, но ниже 5 об.%);
- содержание горючего газа выше третьего заданного порогового значения, но ниже четвертого заданного порогового значения (например, выше 5 об.%, но ниже 8 об.%);
- содержание горючего газа выше четвертого заданного порогового значения (например, выше 8 об.% и до 100 об.%);

Первый режим: работа системы при отсутствии горючего газа в атмосфере. В этом режиме выходной сигнал измерительных схем низких и высоких концентраций метана равен нулю. На выходах пороговых устройств 14 и 22, устанавливается уровень сигналов соответствующей логической единицы. При таком сочетании сигналов на управляющих входах коммутаторов не поступают сигналы на включение световой сигнализации 10 и сигнала на отключение электроэнергии в аппарат сигнализации 1, а показания на цифровом табло будут нулевыми по низким концентрациям.

При отсутствии горючего газа в атмосфере осуществляется проверка функционирования основных узлов системы контроля. При ручном переключении коммутатора 11, происходит скачкообразный разбаланс измерительной схемы низких концентраций и на ее выходе появляется сигнал, величина которого превышает уставку срабатывания первого 8, второго 12 и четвертого 14 пороговых устройств, в результате чего на их выходах появляются сигналы логического нуля, что приводит к выдаче сигналов на срабатывание световой сигнализации первого и второго уровней в устройстве сигнализации 10 и выдаче сигнала на отключение электроэнергии участка в аппарат сигнализации 1.

Изменение сигналов на выходе четвертого 14 порогового устройства обеспечивает передачу на вход устройства индикации 23 сигнала с тракта измерений высоких концентраций, что позволяет, кроме проверки тракта отключения электроэнергии и световой сигнализации, производить проверку и, при необходимости, настройку баланса измерительной схемы высоких концентраций 5 по цифровому табло устройства индикации 23.

При содержании горючего газа в атмосфере ниже первого порогового значения (например, выше 0 об.%, но ниже 1 об.%), учитывая то, что содержание горючего газа в атмосфере в этом режиме ниже уставок срабатывания пороговых устройств, состояние коммутаторов не изменится, и связи в электрической схеме системы останутся неизменными, и состояние схемы будет аналогичным первому режиму, только в устройстве индикации 23 на цифровом табло будет высвечиваться соответствующее содержание метана и на выходе телеметрического усилителя 13 будет непрерывный токовый сигнал, который соответствует содержанию горючего газа.

В третьем режиме, когда содержание горючего газа в атмосфере выше первого порогового значения, но ниже второго порогового значения (например, выше 1 об.%, но ниже 1,3 об.%), так как уровень сигналов превышает уставку срабатывания только второго порогового устройства 12, то только на его выходе сигнал поменяется с уровня логической единицы на уровень логического нуля. Сигнал с первого выхода порогового устройства 12 попадает в устройство формирования сигналов телесигнализации 9, где формируется и поступает на вход устройства световой сигнализации 10 сигнал на срабатывание световой сигнализации по первому пороговому уровню. Со второго выхода порогового устройства 12 поступает сигнал на реле времени 15, откуда на третий вход устройства формирования сигналов телесигнализации 9 поступает сигнал, который формирует команду на отключение технологических объектов по первому пороговому уровню с выдержкой времени, и который со второго выхода устройства формирования сигналов телесигнализации 9 поступает на аппарат сигнализации 1. В устройстве индикации на цифровом табло будет высвечиваться соответствующий уровень содержания горючего газа, а на выходе телеметрического усилителя 13 будет токовый непрерывный сигнал, который соответствует содержанию метана.

В четвертом режиме, когда содержание горючего газа в атмосфере выше второго порогового значения, но ниже третьего заданного порогового значения (например, выше 1,3 об.%, но ниже 5 об.%), на выходах пороговых устройств 8

и 12 уровень поменяется с уровня логической единицы на уровень логического нуля, а на выходах пороговых устройств 14 и 22 сигналы остаются неизменными. Сигналы с выходов пороговых устройств 8 и 12 попадают в устройство формирования сигналов телесигнализации 9, где формируется и поступает на вход устройства световой сигнализации 10 сигнал на срабатывание световой сигнализации по первому и второму пороговым уровням. Со второго выхода устройства формирования сигналов телесигнализации 9 на аппарат сигнализации 1 поступает сигнал на отключение технологических объектов по второму уровню срабатывания. В устройстве индикации 23 на цифровом табло будет высвечиваться содержание метана, а на выходе телеметрического усилителя 13 будет токовый непрерывный сигнал, соответствующий содержанию.

В пятом режиме, при содержании горючего газа в атмосфере выше третьего заданного порогового значения (например, выше 5 об.%, но ниже 8 об.%), сигналы с измерительных схем низких и высоких концентраций таковы, что они превышают уставки срабатывания пороговых устройств 8, 12 и 14. Пороговое устройство 22 останется в исходном положении. Превышение уставок пороговых устройств 8 и 12 приведут к состоянию, аналогичному их состоянию в четвертом режиме, а превышение уставки порогового устройства 14 поменяет связи между устройствами системы. На вход устройства индикации 23 будет поступать сигнал с измерительной схемы высоких концентраций и на цифровом табло будут высвечиваться показания по шкале высоких концентраций, которые будут соответствовать содержанию горючего газа в атмосфере. На вход телеметрического усилителя 13 будет поступать прерывистый сигнал с тракта измерительной схемы высоких концентраций. С выхода телеметрического усилителя 13 выходит токовый прерывистый сигнал, который будет соответствовать содержанию горючего газа по шкале высоких концентраций.

В шестом режиме, при содержании метана выше четвертого заданного порогового значения (например, выше 8 об.% и до 100 об.%), дополнительно изменяется состояние порогового устройства 22, который блокирует работу средств защиты таким образом, чтобы не происходило отключение защиты если в данном диапазоне измерений с измерительной схемы низких концентраций поступит сигнал, который по уровню будет ниже уставок срабатывания пороговых устройств 8, 12 или 14, то есть, нарушится однозначность показаний измерительной схемы низких концентраций. Снятие блокировки возможно только в том случае, если с выходов пороговых устройств 14 и 22 поступят сигналы уровня логической единицы, то есть концентрация метана будет ниже третьего порогового значения.

Рассмотренному техническому решению по обеспечению однозначности контроля метана присущ недостаток, заключающийся в том, что введение второго измерительного моста обуславливает необходимость дополнительных затрат энергии, что ограничивает возможности использования такого решения в переносных газоанализаторах. Учитывая это, а также особенности эксплуатации этого класса измерительных средств, заключающихся в том, что длительность эксплуатации таких средств при высоких концентрациях метана (когда возможна неоднозначность показаний приборов и срабатывания сигнализации)

не превышает времени выхода работающих из загазированных участков, нами предложен метод измерения концентрации метана в диапазоне 0 – 100 об.% с использованием одного измерительного моста. Сущность метода состоит в том, что в диапазоне 0–6 об.% измерение осуществляется термокаталитическим методом, а в диапазоне концентраций 6–100 об.% термокондуктометрическим методом - по величине напряжения на сравнительном элементе при питании измерительного моста от источника стабильного тока. Причем, при работе измерителя в диапазоне 0 – 5 об.% (до момента перехода к измерению высоких концентраций) постоянно осуществляется автоматическая подстройка тракта измерения высоких концентраций, так, чтобы выходное напряжение схемы измерения высоких концентраций соответствовало результатам измерения полученным от схемы измерения низких концентраций.

Сущность предлагаемого решения можно уяснить с рис. 5.15.

Сигнализатор содержит измерительный мост, питающийся от источника стабилизированного тока, масштабирующие дифференциальные усилители 1 и 2, дифференциальный усилитель 3, компаратор 4, устройство индикации 5, пороговое устройство 7, генератор импульсов 7, реверсивный счетчик 8 и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) 9.

Работа сигнализатора осуществляется в следующей последовательности. При включении измерителя на входы масштабирующих усилителей 1 и 2 подаются напряжения, соответственно, с компенсационного элемента и диагонали измерительного моста. Напряжение с выхода усилителя 1 подается на первый вход дифференциального усилителя 3. На второй вход этого усилителя подается напряжение с выхода ЦАП 9. В момент включения реверсивный счетчик 8 находится в обнуленном состоянии и напряжение на выходе ЦАП равно нулю. При таком соотношении напряжений на выходе усилителя 3 устанавливается отрицательное напряжение насыщения близкое к $-U_{пит}$ которое, независимо от величины выходного напряжения усилителя 2 в период разогрева термогруппы, переводит счетчик 8 через компаратор 4 в режим суммирования импульсов, поступающих от генератора 7. По мере накопления импульсов в счетчике величина выходного напряжения ЦАП увеличивается и к моменту затухания переходных процессов, вызванных разогревом термоэлементов, дифференциальный усилитель 3 выходит с режима насыщения. Режим суммирования импульсов продолжается до тех пор, пока выходное напряжение усилителя 3 $U_{выс}$ не превысит на небольшую величину выходное напряжение усилителя 2 $U_{низ}$, который подключен к измерительному мосту с термокаталитическим датчиком. При незначительном превышении напряжения $U_{выс}$ величины $U_{низ}$ компаратор 4 меняет свое состояние и переводит счетчик 8 в режим вычитания. Вычитание продолжается до тех пор пока напряжение $U_{выс}$ не несколько ниже величины напряжения $U_{низ}$. В этом случае происходит изменение состояния компаратора 4 и обратный перевод счетчика в режим суммирования. Таким образом, при отсутствии метана или его дозрывной концентрации на выходе усилителя 3 поддерживается $U_{выс} = U_{низ}$, которое поступает на устройство индикации 5 и показания на индикаторе измерителя соответствуют результатам измерения концентрации метана термокаталитическим датчиком.

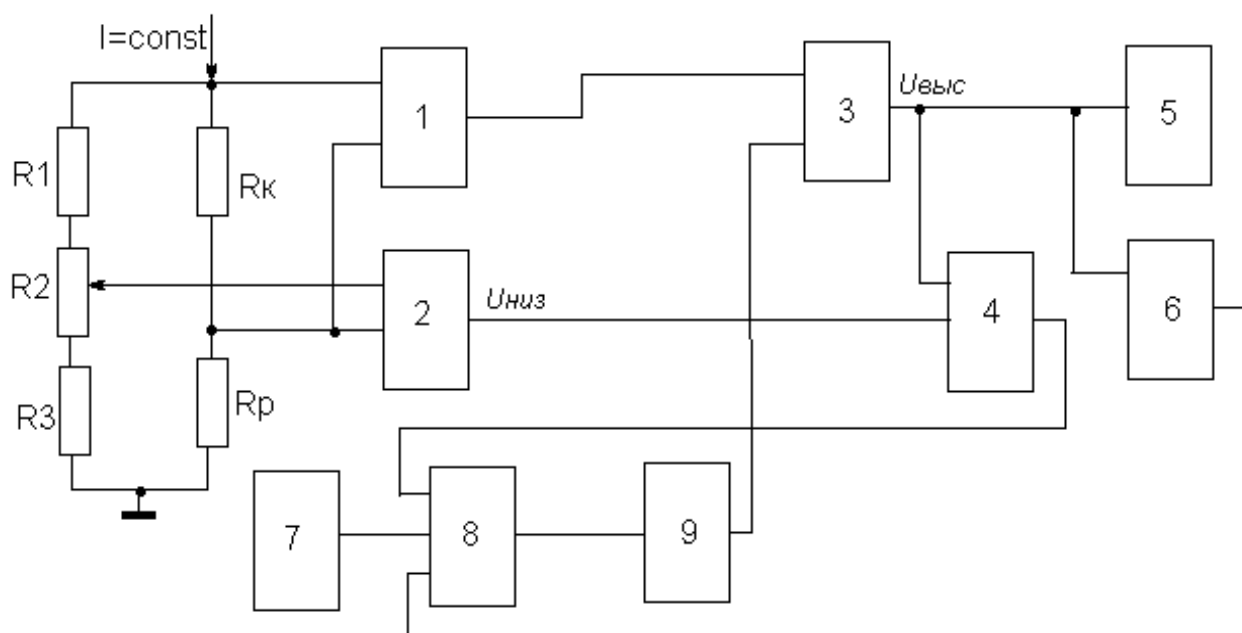


Рис. 5.15. Структурная схема однозначного сигнализатора метана

При превышении концентрации метана 6 об.%, когда существует возможность неоднозначной работы термокаталитического датчика, пороговое устройство 6 меняет свое состояние чем запрещает изменение состояния счетчика 8 и сигнализатор переходит в режим измерения основанный на кондуктометрическом принципе. Дальнейший рост концентрации метана приводит к увеличению теплопроводности смеси, снижению напряжения на компенсационном элементе и, соответственно, при постоянной величине напряжения с выхода ЦАП к росту напряжения на выходе усилителя 3 $U_{\text{выс}}$, которое подается на устройство индикации.

Снятие запрета на изменение состояния счетчика возможно только после снижения концентрации метана ниже 6 об.% и изменения состояния порогового устройства 6. При этом измеритель переходит в режим контроля содержания метана термокаталитическим методом и одновременно осуществляется корректировка тракта измерения высоких концентраций по показаниям термокаталитического датчика.

Режим питания термогруппы стабилизированным током обеспечивает независимость величины напряжения на компенсационном элементе от параметров рабочего элемента, например при выявленном нами срыве реакции каталитического окисления метана в диапазоне взрывных концентраций или наличии значительной петли гистерезиса при работе термокаталитического датчика. Кроме того, такой режим питания повышает чувствительность термокондуктометрического датчика практически в два раза по сравнению с чувствительностью термокондуктометрического датчика с компенсационным термоэлементом при питании его от источника стабилизированного напряжения. Последнее объясняется тем, что при питании термоэлементов от источника стабилизи-

ванного напряжения, снижение температуры элемента и, следовательно, величины его сопротивления, связанное с ростом концентрации метана и увеличением теплопроводности смеси, приводит к увеличению тока протекающего через элементы и дополнительному их разогреву. На рис. 5.16 приведена экспериментальная зависимость напряжения на компенсационном элементе термокаталитического датчика от концентрации метана, снятая для серийно выпускаемой термогруппы при питании термогруппы от источника стабилизированного тока с $I=185 \text{ мА}$, и зависимость напряжения на чувствительном элементе термокондуктометрического датчика при питании его от источника стабилизированного напряжения $U=1,9 \text{ В}$ (в качестве чувствительного элемента термокондуктометрического датчика использовался сравнительный элемент термогруппы, а сравнительного – постоянный резистор сопротивлением $5,14 \text{ Ом}$, что соответствует сопротивлению используемого сравнительного элемента при номинальном режиме питания и отсутствии метана в смеси).

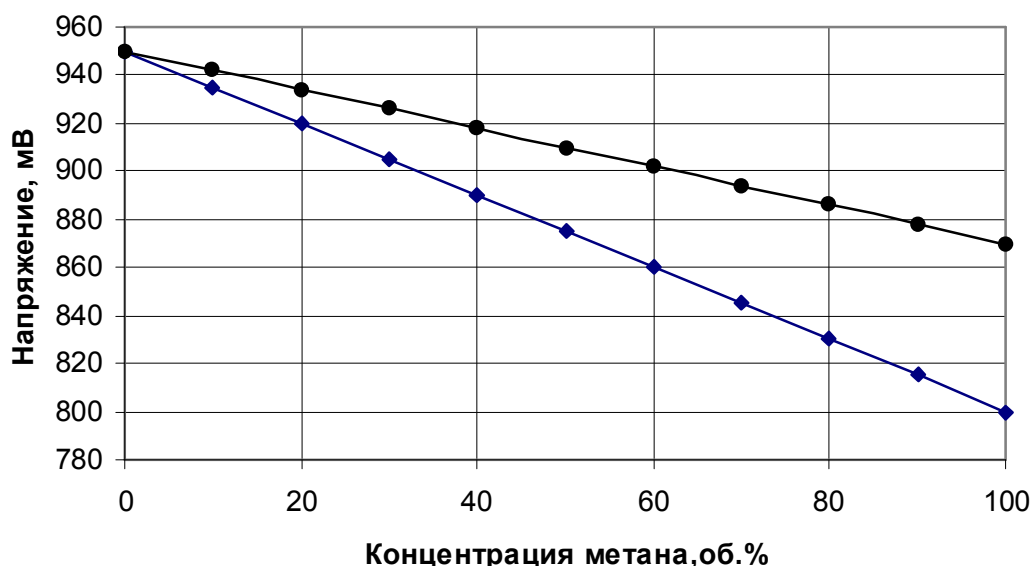


Рис. 5.16 Зависимость напряжения на сравнительном элементе термокаталитического датчика от концентрации метана: \blacklozenge и \bullet - соответственно, при питании от источника стабилизированного тока и напряжения

Как видно из приведенных на рис. 5.16 данных, при питании термокаталитического датчика от источника стабилизированного тока напряжение на компенсационном элементе снижается на $1,5 \text{ мВ/об.}\% \text{ CH}_4$, что практически в два раза превышает чувствительность термокондуктометрического датчика с аналогичными параметрами чувствительного элемента при питании его от источника стабилизированного напряжения ($0,8 \text{ мВ/об.}\% \text{ CH}_4$).

Таким образом предложенные методы и средства контроля содержания метана в шахтной атмосфере обеспечивает однозначный контроль и измерение содержания горючих газов в диапазоне от 0 до 100 об.% и в тоже время обеспечивают возможность применения существующих каналов связи и устройств представления информации на поверхности шахты. Описанные решения были

реализованы на практике с использованием аналоговых и цифровых элементов и микросхем, а в последствии с использованием современной микропроцессорной базы.

5.5. Диагностика стационарных средств контроля метана

Эксплуатация существующих стационарных средств контроля содержания метана связана со значительными расходами, обусловленными необходимостью периодической проверки их работоспособности. Вопросы автоматической диагностики таких средств до сих пор не нашли удовлетворительного решения особенно в части диагностики основного элемента средств контроля – термогруппы, надежность которой на несколько порядков ниже надежности остальных элементов.

Применение предложенной схемы включения термогруппы и двойного газодиффузионного фильтра позволяет осуществить диагностику состояния термогруппы по ряду важнейших ее параметров: работоспособности термогруппы, наличию нуля измерительного моста, активности рабочего элемента, целостности газодиффузионного фильтра, работоспособности и правильности настройки схемы, обеспечивающей однозначность срабатывания защиты и др.

В общем случае диагностика может осуществляться или автоматически, по команде внутреннего таймера, или по внешнему запросу, например, запросу с поверхности в ремонтную смену. Для существующих стационарных средств контроля, имеющих индивидуальные каналы телеизмерения, наиболее просто реализовать диагностику по запросу с поверхности. В перспективе, при внедрении микропроцессорных средств обработки информации от первичных преобразователей, целесообразно ведение диагностики в автоматическом режиме.

Рассмотрим возможность диагностики важнейших параметров термогрупп. Проверка нуля измерительного моста, в том числе при наличии метана, может быть осуществлена путем кратковременного снижения величины тока, протекающего через термоэлементы $I_{mг}$ до значения, при котором прекращается процесс горения метана. Такая проверка может быть осуществлена только при условии термической балансировки термогруппы, описанной ранее. Для осуществления проверки необходимо иметь элементы управления режимом работы термогруппы, обеспечивающие поддержание двух стабильных значений $I_{mг}$ (например, 185мА и 160мА), причем балансировку термогруппы целесообразно осуществлять именно при данных значениях тока. Длительность переходного процесса для серийно-выпускаемых термогрупп обычно не превышает 10с.

При скачкообразном изменении $I_{mг}$ от пониженного к номинальному значению в силу инерционности процессов разогрева элементов, в течение 2-3 с напряжение на компенсационном элементе оказывается ниже своего номинального значения. Типичный вид переходного процесса, полученный экспериментально для этого случая, проведен на рис. 5.17. Как видно из рисунка, в начальной фазе переходного процесса возникает ситуация, аналогичная работе термогруппы при высоких концентрациях метана, что позволяет проверить работу схемы, обеспечивающей однозначность срабатывания защиты.

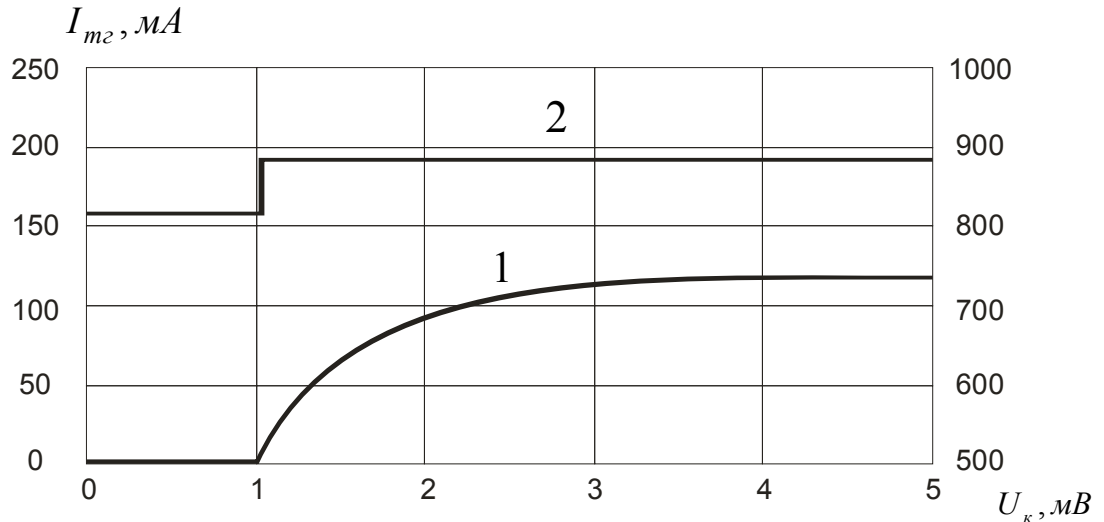


Рис. 5.17. Изменение напряжения на компенсационном элементе (1) при скачкообразном изменении I_{mz} (2).

После разогрева рабочего элемента возобновляется процесс горения метана. За время, в течение которого осуществлялась проверка нуля измерительного моста, выгорания метана в реакционной камере не было, поэтому его концентрация в камере и выходное напряжение моста после паузы, до установления стационарного процесса горения, будут выше, чем до паузы.

Концентрация метана в камере при стационарном режиме горения в начале паузы определяется как

$$C_{mko} = C_{ma} \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{\phi} + \gamma_{\varepsilon}}.$$

В течение паузы длительность t происходит изменение концентрации метана в камере, скорость которого будет

$$\frac{\alpha C_{mk}}{\alpha t} = \frac{\gamma_{\phi}}{V_p} (C_{ma} - C_{mk}), \quad (5.13)$$

где V_p – объем реакционной камеры.

Решение уравнения с учетом начальных условий имеет вид

$$C_{mk} = C_{mko} + C_{ma} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\phi}}{V_p} t\right) \right]. \quad (5.14)$$

При сильном ограничении диффузии и малой длительности паузы выражение (5.13) можно представить в виде

$$C_{mk} = C_{mko} + C_{ma} \frac{\gamma_{\phi}}{V_p} t. \quad (5.15)$$

Наличие более высокой концентрации в камере после паузы приводит к первоначальному всплеску выходного напряжения моста, нормированное значение которого в таком случае будет

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} = \frac{(\gamma_{\phi} + \gamma_{\varepsilon})}{V_p} t. \quad (5.16)$$

Так как γ_{ε} при сильном ограничении диффузии существенно превышает γ_{ϕ} , то

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых.о.}}} \approx \frac{\gamma_{\varepsilon} t}{V_p} \quad (5.17)$$

и при постоянном времени паузы и объема реакционной камеры характеризует, прежде всего, каталитическую активность элемента.

На рис. 5.18 приведены экспериментально снятые кривые переходных процессов для новой термогруппы и той же термогруппы «отравленной» высокой концентрацией SO_2 и частично потерявшей свою каталитическую активность. Концентрация метана $C_M=1,03\%$, размеры калиброванного отверстия $l=0,5$ мм, $d=0,85$ мм. Как видно из рисунка, до момента начала паузы ($t=5$ с) выходные напряжения являются достаточно близкими, несмотря на потерю каталитической активности элемента. Относительные величины амплитуд всплеска выходного напряжения после 20 секундной паузы (начало разогрева $t=25$ с) существенно отличаются, что позволяет достаточно эффективно выявить потерю каталитической активности термогруппы, наступившую вследствие отравления или иных причин.

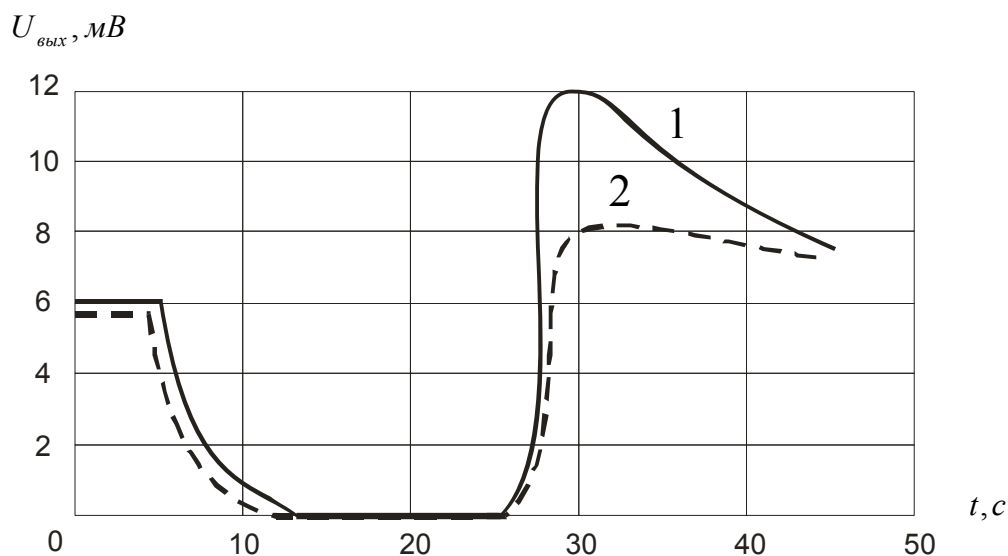


Рис. 5.18. Переходные процессы при диагностике новой термогруппы (1) и той же термогруппы «отравленной» SO_2 (2).

Аналогичная ситуация возникает и при нарушении целостности реакционной камеры, так как увеличение γ_{ϕ} приводит к повышению установившейся концентрации в камере и, следовательно, снижает относительную скорость поступления метана в камеру во время паузы и относительную величину амплитуды всплеска выходного напряжения.

При проведении диагностики термогруппы фактически проверяется и работоспособность всех элементов средств контроля. Однако для проверки коэф-

фициентов передачи измерительных преобразователей, диагностики состояния линии связи и порогов срабатывания защиты при проведении диагностики необходимо, кроме того, предусмотреть подачу нормированных сигналов на вход измерительных преобразователей.

Выводы

На основании выполненных исследований, изложенных в главе 5, можно сделать следующие выводы:

1. Стабильность нулевых показаний средств контроля содержания метана можно повысить путем обеспечения идентичности вольтамперных характеристик вблизи рабочей точки термогруппы. При применении серийно выпускаемых термогрупп и принятой методике подбора термоэлементов подбор вольтамперных характеристик элементов может быть осуществлен путем балансировки термогрупп путем включения шунтирующих резисторов параллельно термоэлементу с большей крутизной характеристики вблизи рабочей точки термогруппы.

2. Временная стабильность термокаталитических датчиков существенно повышается в результате чернения сравнительного элемента сульфидом серебра, которое позволяет не только устранить смещение вольтамперной характеристики сравнительного элемента за счет изменения его окраски в процессе эксплуатации, но и выровнять удельный вес различных механизмов теплообмена для рабочего и сравнительного элементов и обеспечить этим идентичность их характеристик.

3. При расположении термоэлементов в дополнительной камере, выполненной в виде газонепроницаемого стакана с отверстием в стенке, и выполнении условия $\gamma_{омв} \ll \gamma_{ф}$ и $\gamma_{омв} \ll \gamma_{э}$ поток метана, окисляющегося на рабочем элементе, практически определяется диффузионным сопротивлением отверстия и не зависит от изменения параметров фильтрэлемента в процессе эксплуатации и эффективной диффузионной проводимости термоэлемента.

4. Введение дополнительного диффузионного сопротивления качественно изменяет характер зависимости выходного напряжения датчика от величины тока: смещает максимум характеристики в область меньших значений токов и приводит к тому, что в значительном диапазоне токов выходное напряжение остается практически постоянным (плато характеристики).

5. Обеспечить однозначность измерения концентрации метана в диапазоне 0–100 об.% возможно при применении двух, постоянно включенных измерительных схем, одна из которых работает на термокаталитическом принципе и предназначена для измерения низких концентраций метана, а другая – термокондуктометрическом принципе и предназначена для измерения высоких концентраций метана или применением одного термокаталитического датчика при условии, что в диапазоне до взрывных концентраций измерение осуществляется термокаталитическим методом, а в диапазоне концентраций 6–100 об.% термо-

кондуктометрическим методом - по величине напряжения на сравнительном элементе при питании измерительного моста от источника стабильного тока.

6. Диагностика состояния измерительной схемы и термогруппы при ее термической балансировке и работе в режиме стилизованного ограничения диффузии, может быть осуществлена дистанционно путем изменения режимов работы термогруппы и схемы. По форме переходного процесса можно установить наличие нуля термогруппы, оценить активность элементов, целостность фильтров, линии связи, работоспособность схемы, обеспечивающий однозначность срабатывания защиты, усилителей и выходных преобразователей.

В результате выполненных исследований:

- разработана методика балансировки термоэлементов, позволяющая уменьшить уход нуля мостовой измерительной схемы серийно изготовленных термогрупп (при изменении величины тока через термоэлементы на ± 10 мА) до $\pm 0,3$ мВ;

- предложена методика подбора элементов в термогруппы при массовом производстве, обеспечивающая повышение качества термогрупп;

- предложен способ измерения содержания горючего газа в шахтной атмосфере, сущность которого состоит в том, что чувствительный элемент датчика помещают в дополнительную газонепроницаемую камеру с калиброванным отверстием внутри объема, ограниченного от атмосферы фильтрующим элементом, а также устройство для его осуществления, обеспечивающие улучшение метрологических и эксплуатационных характеристик средств контроля;

- разработаны методы и средства контроля содержания метана в шахтной атмосфере, обеспечивающие однозначный контроль в диапазоне от 0 до 100 об.% и возможность применения существующих каналов связи и устройств представления информации на поверхности шахты.

ГЛАВА 6. ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ КОНТРОЛЯ МЕТАНА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АНАЛИЗАТОРОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ ЗАГАЗИРОВАНИЯХ

6.1. Обоснование способа контроля с использованием термokatалитического датчика метана с неодинаковыми электротепловыми параметрами чувствительных элементов

Термокatalитические датчики, наиболее часто применяемые в практике газового анализа, обычно содержат газопроницаемую рабочую камеру, в которой установлены идентичные по сопротивлению и размерам термоэлементы, включенные в мостовые измерительные схемы [29, 30]. Такое выполнение датчиков позволяет в значительной мере обеспечить стабильность нуля мостовой измерительной схемы при изменении параметров питания, газового состава и температуры анализируемой среды. В то же время выполненные нами исследования показали, что при принятых температурных режимах термоэлементов в аварийных условиях, когда лимитирующим агентом является кислород воздуха и помимо метана в атмосфере горных выработок присутствуют водород, оксид углерода и высшие гомологи метана, в результате окисления указанных примесей на сравнительном элементе возникает резкое снижение выходного сигнала (вплоть до инверсии) и существующие термокatalитические датчики не обеспечивают контроля взрывоопасности газовой смеси. Кроме того, выбор высокой температуры предварительного нагрева термоэлементов ведет к увеличению скорости накопления продуктов термической деструкции углеводородов на сравнительном элементе, его активации и смещению нуля измерительного моста, а при низкой температуре предварительного нагрева возникает карбонизация рабочего элемента и снижается чувствительность датчика.

Одним из возможных путей разрешения указанного противоречия может быть использование различных тепловых режимов чувствительных элементов в термокatalитическом датчике. Так, при выборе температуры рабочего элемента 400 °С, а температуры сравнительного ниже 300 °С фактически исключается карбонизация обоих элементов, обеспечивается стабильность нуля и чувствительности датчика и в то же время низкая температура сравнительного элемента исключает возможность окисления на нем горючих компонентов при аварийных загазованиях горных выработок шахт. В то же время при различных тепловых режимах чувствительных элементов нарушается их электротепловая аналогия, что может привести к снижению стабильности измерительного моста. Поэтому такое решение должно быть в достаточной мере обоснованным.

Близкая, по сути, задача рассматривалась авторами работ [77, 78], при теоретическом обосновании параметров термокондуктометрического датчика метана с изолированным сравнительным элементом. Различие тепловых режимов чувствительных элементов однокамерного термокондуктометрического датчика обеспечивалось в данном случае за счет изготовления спиралей термоэлементов пелисторного типа платинового микропровода различного диаметра. Несмотря на близость решаемых задач, результаты полученные в [77, 78] не в

полной мере могут быть приемлемы при разработке термокаталитического датчика, поскольку режимы работы термоэлементов в термокаталитическом и термокондуктометрическом датчиках существенно отличаются, а реакция чувствительного элемента на контролируемый компонент диаметрально противоположна. Это определяет и существенные отличия относительно рекомендуемых режимов питания измерительных мостов, обеспечивающих стабильность нуля и линейность характеристик анализаторов при применении термокаталитических и термокондуктометрических датчиков [79, 80].

Обеспечить разные тепловые режимы чувствительных элементов можно различными способами, например, выполнением термоэлементов с разным сопротивлением или разными размерами, шунтированием одного из элементов и др. Рассмотрим наиболее простой по технологичности вариант, заключающийся в шунтировании сравнительного элемента существующего серийно выпускаемого симметричного термокаталитического датчика (рис. 6.1).

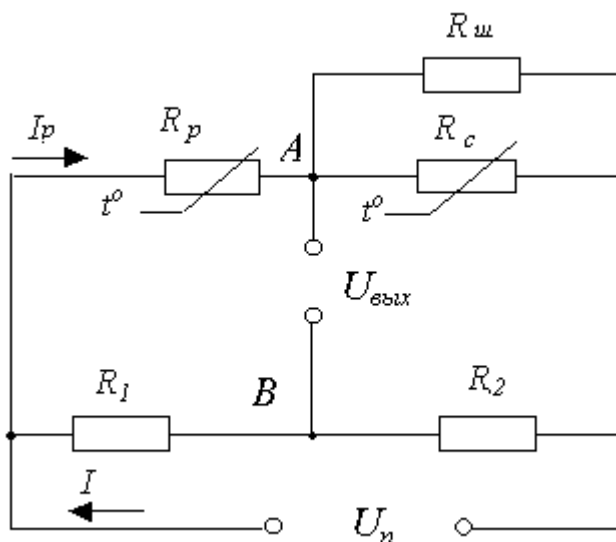


Рис. 6.1. Схема моста с термоэлементами существенно отличающимися тепловыми режимами: R_p , R_c – термоэлементы; $R_{ш}$ – шунтирующий резистор; R_1 , R_2 – балластные резисторы.

Учитывая то, что менее нагретый сравнительный элемент будет иметь существенно меньшее сопротивление приведенный на рис. 6.1 мост является несимметричным, при необходимости для симметрирования измерительного моста в ветвь моста со сравнительным элементом вводится дополнительное сопротивление R_0 .

Условия баланса несимметричной мостовой измерительной схемы можно записать в виде

$$\frac{U_p}{U_c} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (6.1)$$

В таком случае при независимости величины сопротивления шунтирующего и балластных резисторов от параметров питания и газовой среды условие сохранения нуля сбалансированного моста будет иметь вид

$$\frac{\Delta U_p}{\Delta U_c} = \frac{U_p}{U_c}, \quad (6.2)$$

где $\Delta U_p, \Delta U_c$ - изменение напряжения на элементах моста при изменении неконтролируемых факторов газовой среды и параметров питания.

Зависимость величины напряжения на термоэлементе термокаталитического датчика от величины тока, полученная в [29], имеет вид

$$U_{\text{э}} = I_{\text{э}} R_{0\text{э}} \left(1 + \beta t_{\text{г}} + \beta b_{\text{э}} I_{\text{э}}^2 \right), \quad (6.3)$$

где $U_{\text{э}}$ - напряжение на термоэлементе, В; $I_{\text{э}}$ - ток через термоэлемент, А; $R_{0\text{э}}$ - сопротивление термоэлемента при 0°C , Ом; β - температурный коэффициент сопротивления, $1/^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{г}}$ - температура газа, $^{\circ}\text{C}$; $b_{\text{э}} = R_{\text{э}} / \alpha_{\text{э}} F_{\text{э}}$ - терморезистивный коэффициент термоэлемента, $^{\circ}\text{C}/\text{A}^2$; $R_{\text{э}}$ - сопротивление термоэлемента при температуре его начального разогрева, Ом; $F_{\text{э}}$ - площадь поверхности элемента, м^2 ; $\alpha_{\text{э}}$ - суммарный коэффициент теплоотдачи элемента при температуре его начального разогрева, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})$.

В работе [30] доказано, что в воздухе в широком диапазоне температур терморезистивный коэффициент платиновых терморезисторов является постоянной величиной, поэтому для идентичных рабочего и сравнительного элементов термогруппы запишем

$$b = \frac{R_{\text{э}}}{\alpha_{\text{э}} F_{\text{э}}} = \frac{R_p}{\alpha_p F_p} = \frac{R_c}{\alpha_c F_c} = \text{const} \quad (6.4)$$

Исходя из выражения (6.3) величина напряжения на рабочем термоэлементе датчика R_p будет

$$U_p = I_p R_0 \left(1 + \beta t_{\text{г}} + \beta b I_p^2 \right), \quad (6.5)$$

где I_p - ток через рабочий термоэлемент, А.

Соответственно напряжение на сравнительном элементе

$$U_c = I_c R_0 \left(1 + \beta t_{\text{г}} + \beta b I_c^2 \right), \quad (6.6)$$

где I_c - ток через сравнительный термоэлемент, А.

В свою очередь напряжение на сравнительном элементе равно

$$U_c = R_{\text{ш}} (I_p - I_c). \quad (6.7)$$

Приравняем правые части уравнений (6.6) и (6.7) и представим полученное уравнение в виде

$$I_c^3 + p I_c + g = 0 \quad (6.8)$$

где $p = \frac{R_{\text{ш}} + R_0(1 + \beta t_{\text{г}})}{R_0 \beta b}$; $g = -\frac{R_{\text{ш}} I_p}{R_0 \beta b}$.

Определим дискриминант уравнения (6.8)

$$\Delta = p^3 / 27 + g^2 / 4 = \frac{1}{4} \left(\frac{R_{uu} I_p}{R_0 \beta b} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{R_{uu} + R_0(1 + \beta t_z)}{R_0 \beta b} \right)^3 \dots \dots \dots (6.9)$$

Так как $\Delta > 0$, то уравнение (6.8) имеет один вещественный и два комплексных корня. Вещественный корень определяется согласно с выражением

$$I_c = \sqrt[3]{-g/2 + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-g/2 - \sqrt{\Delta}}.$$

Тогда выражение для определения тока через сравнительный элемент будет иметь вид

$$I_c = \sqrt[3]{\frac{R_{uu} I_p}{2R_0 \beta b} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R_{uu} I_p}{R_0 \beta b} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{R_{uu} + R_0(1 + \beta t_z)}{R_0 \beta b} \right)^3}} + \sqrt[3]{\frac{R_{uu} I_p}{2R_0 \beta b} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R_{uu} I_p}{R_0 \beta b} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{R_{uu} + R_0(1 + \beta t_z)}{R_0 \beta b} \right)^3}} \quad (6.10)$$

Подставив полученное значение тока в (6.7) получим уравнение для определения напряжения на сравнительном элементе

$$U_c = R_{uu} I_p - R_{uu} \sqrt[3]{\frac{R_{uu} I_p}{2R_0 \beta b} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R_{uu} I_p}{R_0 \beta b} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{R_{uu} + R_0(1 + \beta t_z)}{R_0 \beta b} \right)^3}} - R_{uu} \sqrt[3]{\frac{R_{uu} I_p}{2R_0 \beta b} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R_{uu} I_p}{R_0 \beta b} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{R_{uu} + R_0(1 + \beta t_z)}{R_0 \beta b} \right)^3}} \quad (6.11)$$

При питании измерительного моста от стабилизированного источника тока все величины, входящие в выражения, являются независимыми от температуры газа. Поэтому, продифференцировав правые части уравнений (6.5) и (6.11) и взяв их отношение можно получить в явном виде условие независимости нуля сбалансированного моста от изменения температуры (6.2) при указанном режиме питания измерительного моста. Следует отметить, что такое аналитическое выражение является весьма сложным и неудобным для анализа, поэтому характер влияния температуры газа на стабильность нуля выясним путем подстановки реальных параметров серийных термокаталитических датчиков в уравнения (6.5) и (6.11) и нахождения численных значений напряжений на термоэлементах и их приращение при изменении температуры газа.

Расчеты выполним при следующих значениях параметров: $I_p = 0,2$ А; $R_0 = 2,0$ Ом; $R_{uu} = 20$ Ом; $\beta = 0,004$ 1/°C; $t_z = 25$ °C; $b = 1 \cdot 10^4$ °C/А².

Расчетные значения напряжений на термоэлементах и их приращения при изменении температуры газа при указанных параметрах составляют: $U_p = 1,08$ В; $U_c = 0,727$ В; $\Delta U_p / \Delta t_z = 1,6$ мВ/°C; $\Delta U_c / \Delta t_z = 0,79$ мВ/°C. Величина отношения $\Delta U_p / \Delta U_c = 2,02$, а $U_p / U_c = 1,49$, следовательно, условие (6.2)

не выполняется и измерительный мост при шунтировании сравнительного элемента является термически несбалансированным. При симметрировании измерительного моста путем введения в ветвь моста со сравнительным элементом дополнительного сопротивления величина $U_p/U_c = 1$, а следовательно температурный дрейф моста возрастет.

Экспериментальная проверка, выполненная нами при использовании серийных термокаталитических датчиков и указанной величине шунта, подтверждает справедливость данного вывода. Температурный дрейф нуля измерительного моста при этом составляет от 0,4 до 0,6 мВ/°С. Учитывая это, такой вариант решения может быть реализован только при дополнительном введении в анализатор датчика температуры и корректировки нуля анализатора за показаниями этого датчика. Учитывая наличие миниатюрных дешевых датчиков температуры в интегральном исполнении с незначительным энергопотреблением и высокими метрологическими характеристиками, такое решение возможно.

Другим решением, обеспечивающим различие тепловых режимов чувствительных элементов однокамерного термокондуктометрического датчика, может быть изготовление сравнительного элемента с меньшим значением терморезистивного коэффициента, что может быть получено путем увеличения его площади поверхности или уменьшения сопротивления термоэлемента.

Рассмотрим вариант термокаталитического датчика с чувствительными элементами имеющие одинаковое сопротивление, в котором площадь поверхности сравнительного элемента является существенно больше площади рабочего элемента. Схема измерительного моста для такого случая приведена на рис. 6.2.

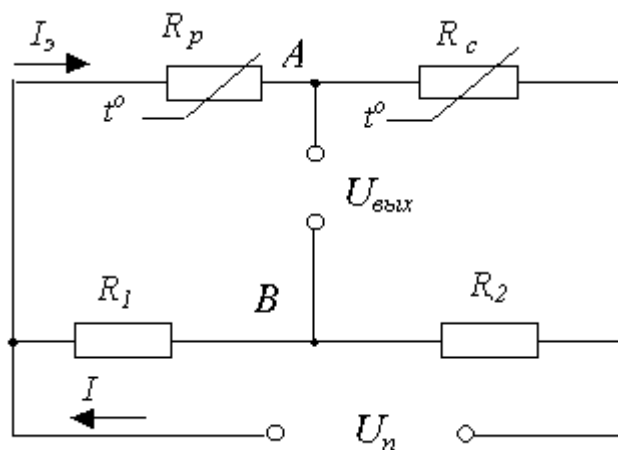


Рис. 6.2. Схема моста с термоэлементами различного размера: R_p , R_c - термоэлементы; R_1 , R_2 - балластные резисторы.

Исходя из выражения (6.3) величина напряжения на рабочем и сравнительном термоэлементах при равенстве их начального сопротивления будет

$$U_p = I_3 R_0 \left(1 + \beta t_2 + \beta b_p I_3^2 \right), \quad (6.12)$$

$$U_c = I_3 R_0 \left(1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2 \right). \quad (6.13)$$

Отношение напряжений на элементах для этого случая составит

$$\frac{U_p}{U_c} = \frac{1 + \beta t_2 + \beta b_p I_3^2}{1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2}. \quad (6.14)$$

Задавшись площадью поверхности сравнительного элемента в 2 раза больше чувствительного, рассчитаем напряжения на элементах при тех же значениях параметров, при условии, что $b_p = 1 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{A}^2$; $b_c = 0,5 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{A}^2$.

Расчетные значения напряжений составляют $U_p = 1,08 \text{ В}$ и $U_c = 0,76 \text{ В}$, а величина отношения $U_p/U_c = 1,42$. При питании измерительного моста от стабилизированного источника тока все величины, входящие в выражения (6.12) и (6.13), являются независимыми от температуры газа, в таком случае получим

$$\frac{dU_p}{dt_c} = \frac{dU_c}{dt_c} = I_3 R_0 \beta. \quad (6.15)$$

Величина отношений приращений напряжения составит $\Delta U_p / \Delta U_c = 1$, а, следовательно, условие независимости нуля сбалансированного моста, приведенного на рис. 6.2, от изменения температуры (6.2) при указанном режиме его питания также не выполняется. Учитывая то, что отношение $\Delta U_p / \Delta U_c = 1$, для обеспечения выполнения условия (6.2) в такой мост необходимо дополнительно ввести добавочное сопротивление для симметрирования напряжений (рис. 6.3).

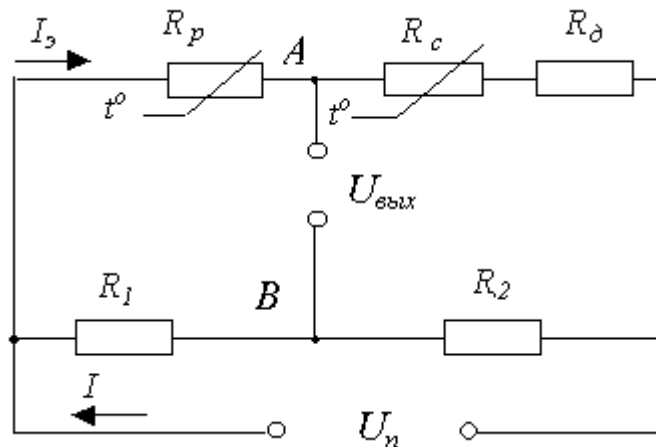


Рис. 6.3. Схема симметричного моста с термоэлементами различного размера: R_p , R_c - термоэлементы; R_1 , R_2 - балластные резисторы; R_d - добавочное сопротивление.

В таком случае величина напряжения на ветви моста со сравнительным элементом составит

$$U_c = I_3 R_0 \left(1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2 \right) + I_3 R_d. \quad (6.16)$$

Необходимую для симметрирования моста величину добавочного сопротивления определим из условия равенства напряжений на ветвях моста при номинальном режиме работы

$$R_0(1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2) + R_\partial = R_0(1 + \beta t_2 + \beta b_p I_3^2). \quad (6.17)$$

Тогда необходимая величина добавочного сопротивления составит

$$R_\partial = R_0 \beta I_3^2 (b_p - b_c). \quad (6.18)$$

При принятых параметрах элементов и режимах питания $R_\partial = 1,6$ Ом.

Таким образом, обеспечить температурную стабильность моста термокаталитического датчика с неодинаковыми электротепловыми параметрами чувствительных элементов, можно применяя терморезисторы с одинаковым начальным сопротивлением и разной площадью поверхности, при условии симметрирования измерительного моста и его питания от источника стабильного тока.

Другим возможным вариантом термокаталитического датчика с неодинаковыми электротепловыми параметрами чувствительных элементов, является датчик с одинаковыми размерами элементов, но с различным их сопротивлением. При изготовлении термокаталитических датчиков пелисторного типа такой вариант легко реализуется при незначительном увеличении шага спирали при навивке термоэлементов и уменьшения за счет этого количества витков. Для данного варианта напряжения на элементах описываются уравнения

$$U_p = I_3 R_{0p} (1 + \beta t_2 + \beta b_p I_3^2), \quad (6.19)$$

$$U_c = I_3 R_{0c} (1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2). \quad (6.20)$$

Отношение напряжений на элементах для этого случая составит

$$\frac{U_p}{U_c} = \frac{R_{0p} (1 + \beta t_2 + \beta b_p I_3^2)}{R_{0c} (1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2)}. \quad (6.21)$$

Задавшись начальным сопротивлением сравнительного элемента $R_{0c} = 0,8 R_{0p}$, рассчитаем напряжения на элементах при тех же значениях параметров, при условии, что $b_p = 1 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{A}^2$; $b_c = 0,8 \cdot 10^4 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{A}^2$.

Расчетные значения напряжений составляют $U_p = 1,08$ В и $U_c = 0,762$ В, а величина отношения $U_p / U_c = 1,42$. При питании измерительного моста от стабилизированного источника тока все величины, входящие в выражения (6.19) и (6.20), являются независимыми от температуры газа, в таком случае получим

$$\frac{dU_p}{dt_c} = I_3 R_{0p} \beta; \quad \frac{dU_c}{dt_c} = I_3 R_{0c} \beta \quad (6.22)$$

Величина отношений приращений напряжения составит

$$\frac{\Delta U_p}{\Delta U_c} = \frac{R_{0p}}{R_{0c}}. \quad (6.23)$$

Расчетное значения отношения при принятых параметрах элементов составит $\Delta U_p / \Delta U_c = 1,25$. Следовательно, условие независимости нуля сбалансированного моста, от изменения температуры (6.2) при указанном режиме его питания также не выполняется. Учитывая то, что отношение $\Delta U_p / \Delta U_c$ меньше величины отношений напряжений, для обеспечения выполнения условия (6.2) в такой мост необходимо также дополнительно ввести добавочное сопротивление. Необходимую величину добавочного сопротивления определим из соотношения

$$\frac{U_p}{U_c} = \frac{R_{0p}(1 + \beta t_z + \beta b_p I_\vartheta^2)}{R_{0c}(1 + \beta t_z + \beta b_c I_\vartheta^2) + R_\partial} = \frac{R_{0p}}{R_{0c}} \quad (6.24)$$

Откуда

$$R_\partial = R_{0c} \beta I_\vartheta^2 (b_p - b_c). \quad (6.25)$$

При принятых параметрах элементов и режимах питания $R_\partial = 0,192$ Ом.

Как видно, обеспечить температурную стабильность моста термोकаталитического датчика с неодинаковыми электротепловыми параметрами чувствительных элементов, можно и при применении терморезисторов с различным начальным сопротивлением и одинаковой площадью поверхности, при условии введения дополнительного сопротивления в плечо моста со сравнительным элементом. Следует отметить, что в отличие от предыдущего варианта в данном случае мост остается несимметричным, однако величина дополнительного резистора, необходимого для обеспечения термической стабильности моста в этом случае существенно меньше, что дает возможность несколько снизить мощность, потребляемую датчиком.

Режим питания моста от источника стабильного тока имеет ряд преимуществ, однако, при таком режиме в условиях газовых перегрузок возможен перегрев чувствительных элементов, приводящий к изменению их параметров. В этом случае предпочтительным является режим питания моста со стабилизацией напряжения на рабочем элементе, при котором обеспечивается стабильный температурный режим рабочего элемента [79].

Оценим температурную стабильность моста с неодинаковыми электротепловыми параметрами чувствительных элементов датчика, работающего в режиме стабильного напряжения на рабочем элементе, при равенстве сопротивлений термоэлементов, но разной площади их поверхности (рис. 6.2).

Величина напряжения на рабочем и сравнительном термоэлементах при равенстве их начального сопротивления будет

$$U_p = I_\vartheta R_0 \left(1 + \beta t_z + \beta b_p I_\vartheta^2 \right), \quad (6.26)$$

$$U_c = I_\vartheta R_0 \left(1 + \beta t_z + \beta b_c I_\vartheta^2 \right). \quad (6.27)$$

Из уравнения (6.26) можно получить в явном виде зависимость величины тока через термоэлементы от величины приложенного напряжения.

Представим уравнение (6.26) в виде

$$I_3^3 + pI_3 + g = 0 \quad (6.28)$$

где $p = \frac{1 + \beta t_2}{\beta b_p}$; $g = -\frac{U_p}{\beta b_p R_0}$.

Определим дискриминант уравнения (6.28)

$$\Delta = p^3 / 27 + g^2 / 4 = \frac{1}{4} \left(\frac{U_p}{\beta b_p R_0} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{1 + \beta t_2}{\beta b_p} \right)^3.$$

Так как $\Delta > 0$, то уравнение (6.28) имеет один вещественный и два комплексных корня. Вещественный корень определяется согласно выражению

$$I_3 = \sqrt[3]{-g/2 + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-g/2 - \sqrt{\Delta}}.$$

Окончательно выражение для определения тока через термоэлемент будет иметь вид

$$I_3 = \sqrt[3]{\frac{U_p}{2\beta b_p R_{0p}} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{U_p}{\beta b_p R_{0p}} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{1 + \beta t_2}{\beta b_p} \right)^3}} + \sqrt[3]{\frac{U_p}{2\beta b_p R_{0p}} - \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{U_p}{\beta b_p R_{0p}} \right)^2 + \frac{1}{27} \left(\frac{1 + \beta t_2}{\beta b_p} \right)^3}}. \quad (6.29)$$

Используя выражение (6.29), рассчитаем значение тока через термоэлементы при $t_2 = 25^\circ\text{C}$ и его приращение при изменении температуры при приведенных ранее параметрах рабочего элемента и стабильном напряжении $U_p = 1,08\text{ В}$. Полученные расчетные значения составляют $I_3 = 0,20\text{ А}$, $\Delta I_3 / \Delta t_2 = -0,137\text{ мА}^\circ\text{C}$.

По (6.27), с использованием значений тока и его приращения рассчитаем напряжение на сравнительном элементе и его температурные изменения. Полученные значения составляют $U_c = 0,76\text{ В}$; $\Delta U_c / \Delta t_2 = 0,617\text{ мВ}^\circ\text{C}$. Учитывая то, что при стабилизации напряжения на рабочем элементе $\Delta U_p / \Delta t_2 = 0$, а также разный характер зависимости приращения тока через термоэлементы и приращения напряжения на сравнительном элементе от температуры, температурную стабильность моста можно обеспечить введением в ветвь моста со сравнительным элементом добавочного сопротивления (аналогично рис.6.3), величина которого составляет $R_0 = 0,617 / 0,137 = 4,5\text{ Ом}$. Напряжение на плече моста со сравнительным элементом составит $U_c = 0,76 + 4,5 \cdot 0,2 = 1,66\text{ В}$, а следовательно такой термостабилизированный мост является несимметричным. Кроме того, в сравнении с режимом со стабилизацией тока, в этом случае в мост вводится большее добавочное сопротивление, что увеличивает энергопотребление моста.

Рассмотрим второй вариант термокаталитического датчика с одинаковыми размерами элементов, но с различным их сопротивлением. Для данного варианта напряжения на элементах описываются уравнениями (6.19) и (6.20).

Аналогично предыдущему варианту расчетные значения тока через термоэлементы при $t_2=25$ °С и его приращение при изменении температуры при приведенных ранее параметрах рабочего элемента и стабильном напряжении $U_p = 1,08$ В, составляют: $I_3 = 0,20$ А, $\Delta I_3 / \Delta t_2 = -0,137$ мА/°С.

По выражению (6.20), с использованием значений тока и его приращения рассчитаем напряжение на сравнительном элементе и его температурные изменения. Полученные значения величин составляют $U_c = 0,7616$ В; $\Delta U_c / \Delta t_2 = 0,175$ мВ/°С. Учитывая то, что при стабилизации напряжения на рабочем элементе $\Delta U_p / \Delta t_2 = 0$, полученное значение температурного изменения напряжения на сравнительном элементе свидетельствует, что данный вариант выполнения датчика при стабилизации напряжения на рабочем элементе является более термостабильным. Учитывая разный характер зависимости приращения тока через термоэлементы и приращения напряжения на сравнительном элементе от температуры, температурную стабильность моста можно аналогично предыдущему случаю повысить введением в ветвь моста со сравнительным элементом добавочного сопротивления (см. рис. 6.3), величина которого составляет $R_d = 0,175 / 0,137 = 1,28$ Ом. Напряжение на плече моста со сравнительным элементом без добавочного сопротивления меньше, чем на рабочем термоэлементе, а с добавочным сопротивлением $U_c = 0,7616 + 1,28 \cdot 0,2 = 1,022$ В, и такой термостабилизированный мост является практически симметричным.

Оценим, существует ли возможность сбалансировать мост без дополнительного резистора, например путем изменения параметров сравнительного элемента. Учитывая то, что при выбранном режиме питания термически сбалансированного моста напряжение на сравнительном элементе при изменении температуры остается постоянным, приравняем правые части уравнения (6.20), найденные при температуре t_2 и $t_2 + \Delta t_2$

$$I_3 R_{0c} (1 + \beta t_2 + \beta b_c I_3^2) = (I_3 + \Delta I_3) R_{0c} [1 + \beta (t_2 + \Delta t_2) + \beta b_c (I_3 + \Delta I_3)^2], \quad (6.29)$$

где ΔI_3 - изменение тока через элементы при изменении температуры на Δt_2 .

Отсюда величина терморезистивного коэффициента, при котором обеспечивается термическая стабильность моста, составит

$$b_c = - \frac{1 + \beta (t_2 + \Delta t_2)}{\beta (3I_3^2 + 3I_3 \Delta I_3 + \Delta I_3^2)}. \quad (6.30)$$

Поскольку выражения в числителе и знаменателе зависимости (6.30) всегда больше нуля то полученное значение терморезистивного коэффициента является отрицательной величиной. Следовательно, термически сбалансировать мост без введения дополнительного сопротивления в данном случае невозможно.

6.2. Разработка и обоснование способа контроля с использованием двухкамерного термокаталитического датчика метана

Применение существующих термокаталитических газоанализаторов для контроля взрывоопасности многокомпонентных газовых смесей затруднено из-за того, что высшие гомологи метана, водород, оксид углерода и другие взрывчатые компоненты смесей при температуре первичного разогрева элементов необходимой для окисления метана способны окисляться не только на рабочем, но и на сравнительном элементе. Кроме того, проведенные нами исследования термокаталитических датчиков метана после их длительной эксплуатации [69] показали, что в них происходит постепенное накопление продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности сравнительного элемента, а это приводит к увеличению его каталитической активности. Окисление горючих компонентов на сравнительном элементе приводит к росту его температуры и повышению активности, каталитическая реакция окисления на нем может переходить с кинетической в диффузионную область, что вызывает резкое снижение выходного сигнала измерительного моста и может привести к нарушению работоспособности средств взрывозащиты.

Предложенные в разделе 6.1 решения, направленные на разработку термокаталитических датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов, позволяют устранить отмеченные недостатки существующих датчиков метана, однако при таком выполнении датчиков нарушается симметрия измерительных мостов, что обуславливает нестабильность их нуля при изменении параметров питания. А это в свою очередь предъявляет повышенные требования к стабильности источников питания таких датчиков. Поэтому целесообразным является дальнейший поиск путей совершенствования термокаталитического способа контроля, позволяющих осуществлять контроль взрывоопасности многокомпонентных газовых смесей, возникающих при аварийных загазованиях горных выработок шахт.

Существующие термокаталитические датчики, выпускаемые отечественными и зарубежными изготовителями, все являются однокамерными. Применение однокамерных датчиков несколько упрощает конструкцию анализаторов и уменьшает мощность, расходуемую на предварительный нагрев элементов. Последнее было существенно для обеспечения искробезопасности аппаратуры при применении термоэлементов, изготовленных в виде полых цилиндров со спиралью из платиновой проволоки, которые характеризовались значительным энергопотреблением. В современных анализаторах используются термоэлементы с малым энергопотреблением, изготовленные в виде миниатюрного шарика из γ -оксида алюминия, нанесенной на спираль из платиновой микропроволоки, и поэтому вопросы энергопотребления являются несущественными.

С другой стороны, в однокамерном датчике наблюдается взаимное влияние термоэлементов друг на друга, что приводит к появлению зависимости выходного сигнала от пространственного расположения датчика. Для уменьшения этой зависимости между термоэлементами устанавливаются теплоизоляционный экран. Наличие экрана увеличивает теплообмен между элементами и корпусом

датчика и несколько снижает его чувствительность. Кроме того, в однокамерном датчике затруднен подбор пар термоэлементов с идентичными электротепловыми характеристиками и отсутствует возможность раздельного управления газодиффузионными потоками, поступающими к элементам.

При небольшой концентрации горючего газа и протекании реакции окисления на рабочем элементе в диффузионной области его поток Q к его поверхности термоэлемента линейно зависит от концентрации газа в реакционной камере и эффективной диффузионной проводимости элемента [30], т.е.

$$Q = \gamma_p C_k, \quad (6.31)$$

где $\gamma_p = 10^{-2} K_{эф} \beta_m F_э$ – эффективная диффузионная проводимость рабочего элемента, м³/с; C_k – концентрация газа в реакционной камере; $K_{эф}$ – коэффициент эффективности окисления газа; β_m – коэффициент массопередачи, м/с.

В таком случае количество тепла, выделяющегося на рабочем элементе, пропорционально эффективной диффузионной проводимости рабочего элемента, концентрации газа в реакционной камере, низшей теплоте его сгорания:

$$P_p = Q_n \gamma_p C_k, \quad (6.32)$$

где Q_n – низшая теплота сгорания газа, Дж/м³.

Температура рабочего элемента определяется суммарной мощностью, выделяемой на элементе от источника электроэнергии $P_{эл}$ и окисления метана, и может быть записана так [29]:

$$P_{эл} + P_p = K(t_p - t_э), \quad (6.33)$$

где K – тепловая проводимость элемента, Вт/°С; t_p – температура рабочего элемента, °С.

Температура сравнительного элемента определяется мощностью, выделяемой на элементе от источника электроэнергии

$$P_{эл} = K(t_c - t_э), \quad (6.34)$$

где t_c – температура сравнительного элемента, °С;

Тогда, при равенстве тепловой проводимости элементов, с учетом выражений (6.32) – (6.34) разница температур рабочего и сравнительного элементов, определяющая выходной сигнал мостовой измерительной схемы равна

$$\Delta t = t_{pэ} - t_{cэ} = \frac{Q_n \gamma_p C_k}{K}. \quad (6.35)$$

Зависимость величины сопротивления платинового термоэлемента $R_э$ от температуры в диапазоне температур, характерных для работы термокаталитического датчика, обычно представляют в линейном виде

$$R_э = R_{э0} (1 + \beta_э t_э), \quad (6.36)$$

где $R_{э0}$ – сопротивление элемента при 0 °С; $\beta_э$ – температурный коэффициент сопротивления элемента, 1/°С.

В таком случае при равенстве начального сопротивления элементов выходное напряжение измерительного моста с однокамерным термокаталитическим датчиком при невысоких концентрациях горючего газа линейно зависит от его концентрации в реакционной камере, т.е.

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\varepsilon 0} I_{\varepsilon} \beta_{\varepsilon} Q_{\text{мн}} \gamma_p C_{\text{мк}}}{2K}. \quad (6.37)$$

Концентрация газа в реакционной камере связана с его концентрацией в анализируемой смеси

$$C_{\text{к}} = C_a \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{\phi} + \gamma_{p\varepsilon}}, \quad (6.38)$$

где γ_{ϕ} – диффузионная проводимость фильтра, м³/с; C_a – концентрация газа в анализируемой смеси.

С учетом выражений (6.37) и (6.38) получим

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\varepsilon 0} I_{\varepsilon} \beta_{\varepsilon} Q_{\text{н}} \gamma_p \gamma_{\phi} C_a}{2K(\gamma_{\phi} + \gamma_p)}. \quad (6.39)$$

При подаче к термокаталитическому датчику горючего газа, который при температуре первоначального разогрева термоэлементов (в термокаталитических датчиках метана составляет более 360 °С) интенсивно окисляется как на рабочем, так и сравнительном элементе, концентрация такого газов в камере будет определяться выражением

$$C_{\text{к}} = C_a \frac{\gamma_{\phi}}{\gamma_{\phi} + \gamma_p + \gamma_c}, \quad (6.40)$$

где γ_c – эффективная диффузионная проводимость сравнительного элемента, м³/с.

Кроме того, разница температур рабочего и сравнительного элементов, от которой зависит выходной сигнал мостовой измерительной схемы в уравнении (6.35), будет определяться не величиной эффективной диффузионной проводимости рабочего элемента, а разностью проводимостей рабочего и сравнительного элементов. В этом случае уравнение (6.39) принимает следующий вид:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\varepsilon 0} I_{\varepsilon} \beta_{\varepsilon} Q_{\text{н}} \gamma_{\phi} (\gamma_{p\varepsilon} - \gamma_{c\varepsilon}) C_a}{2K(\gamma_{\phi} + \gamma_{p\varepsilon} + \gamma_{c\varepsilon})}. \quad (6.41)$$

Как видим, присутствие в смеси компонентов, которые при температуре первоначального разогрева термоэлементов интенсивно окисляются как на рабочем, так и сравнительном элементе, ведет к снижению выходного сигнала мостовой измерительной схемы с однокамерным термокаталитическим датчиком и уменьшению надежности работы средств контроля взрывоопасности.

При невысоких концентрациях горючих компонентов в многокомпонентных газовых смесях величина выходного напряжения измерительного моста с

однокамерным термокаталитическим датчиком обычно определяется как сумма выходных напряжений от каждого компонента в отдельности

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\varepsilon 0} I_{\varepsilon} \beta_{\varepsilon}}{2K} \sum_{i=1}^n Q_{i\text{н}} C_{i\text{а}} \frac{\gamma_{i\text{ф}} (\gamma_{i\text{р}} - \gamma_{i\text{с}})}{\gamma_{i\text{ф}} + \gamma_{i\text{р}} + \gamma_{i\text{с}}}. \quad (6.42)$$

Однако при больших концентрациях горючих газов, наличие в смеси горючих компонентов, которые интенсивно окисляются на сравнительном элементе, приводит к дополнительному разогреву и активации этого элемента, в том числе и по отношению к метану. В результате активации сравнительного элемента его эффективная диффузионная проводимость по отношению ко всем горючим компонентам увеличивается, а величина выходного напряжения измерительного моста существенно снижается, вплоть до инверсии выходного напряжения моста. Более того, как показали результаты экспериментальных исследований однокамерных термокаталитических датчиков, приведенные нами во втором разделе, при наличии в смеси газов компонентов с низкой температурой воспламенения, в результате активации сравнительного элемента существенное снижение показаний анализаторов метана наблюдаются и в области до взрывных концентраций газов. Это может привести к нарушению работы средств автоматической газовой защиты.

Рассмотрим, существует ли возможность исключить указанные недостатки газоанализаторов при выполнении термокаталитических датчиков двухкамерными. В отличие от однокамерных при применении двухкамерных датчиков существует возможность отдельного управления величиной диффузионной проводимости фильтров при одновременном сохранении электротепловой аналогии элементов. Для обеспечения высокой чувствительности и малой постоянной времени анализаторов диффузионная проводимость фильтра первой камеры датчика, в которой установлен рабочий элемент, должна быть соизмеримой с эффективной диффузионной проводимостью рабочего элемента [82, 83]. Диффузионная проводимость фильтра второй камеры датчика, в которой установлен сравнительный элемент не влияет на чувствительность и быстродействие анализатора и может быть выбрана на несколько порядков меньше, чем у первой камеры. Минимальное ее значение ограничивается только условиями обеспечения компенсации изменений давления и содержания неконтролируемых газовых компонент рудничной атмосферы. Для такого случая можно записать

$$\gamma_{\text{рф}} \gg \gamma_{\text{сф}}, \quad (6.43)$$

где $\gamma_{\text{рф}}$, $\gamma_{\text{сф}}$ - соответственно диффузионная проводимость фильтров камер датчика с рабочим и сравнительным элементом, м³/с.

При выполнении условия (6.43) количество тепла, выделяющегося на рабочем элементе, будет определяться концентрацией горючих компонентов, их теплотворной способностью и соответствующими диффузионными проводимостями фильтра и рабочего элемента. С некоторым приближением можно считать, что величина этого тепловыделения пропорциональна суммарной тепло-

творной способности газовой смеси и характеризует ее взрывчатые свойства. Количество тепла, выделяющегося в этом случае на сравнительном элементе от окисления горючих газов, способных окисляться на его поверхности при температуре предварительного разогрева элемента, практически не зависит от каталитической активности элемента по отношению к этим газам, а определяется диффузионной проводимостью фильтра камеры датчика со сравнительным элементом. С учетом выражения (6.42), величина тепловыделения от окисления горючих газов на сравнительном элементе в любом случае будет на несколько порядков меньше величины тепловыделения, обусловленного окислением этих газов на рабочем элементе. Пренебрегая тепловыделением на сравнительном элементе, уравнение (6.39) для многокомпонентной смеси можно представить так:

$$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\varepsilon 0} I_{\varepsilon} \beta_{\varepsilon}}{2K} \sum_{i=1}^n Q_{iH} \gamma_i C_{ia}, \quad (6.44)$$

где $\gamma_i = \gamma_{ip} \gamma_{if} / (\gamma_{if} + \gamma_{ip})$ - суммарная диффузионная проводимость фильтра и рабочего элемента для i -го горючего газа, м³/с; C_{ia} , Q_{iH} , γ_{ip} , γ_{if} - соответственно концентрация в воздухе, низшая теплота сгорания, эффективная диффузионная проводимость элемента и диффузионная проводимость фильтра для i -го горючего газа.

Повышение активности сравнительного элемента вследствие карбонизации его поверхности при длительной эксплуатации анализатора в данном случае практически не вызывает дополнительного разогрева этого элемента, так как количество тепла, выделяемого от окисления любого компонента на сравнительном элементе, при выполнении условия (6.43) незначительно. Это исключает случаи нарушения работоспособности термокatalитических газоанализаторов и отказы средств взрывозащиты.

Следует также отметить, что рассмотренный двухкамерный датчик может работать при повышенных температурах предварительного разогрева элементов, что увеличивает чувствительность анализаторов, исключает гистерезис показаний анализаторов и препятствует карбонизации поверхности чувствительного элемента. К достоинствам такого датчика следует отнести и отсутствие взаимного теплового влияния термоэлементов друг на друга и, следовательно, его нечувствительность к пространственному расположению.

Таким образом, выполнение термокatalитических датчиков двухкамерными с диффузионной проводимостью фильтра камеры, в которой установлен сравнительный элемент значительно меньшей диффузионной проводимости фильтра камеры с рабочим элементом, позволяет существенно улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики газоанализаторов, исключить случаи неоднозначной их работы после длительной эксплуатации и при наличии в газовых смесях компонентов, способных окисляться на сравнительном элементе при температуре предварительного разогрева элементов.

6.3. Обоснование конструкции и режимов работы термоэлементов двухкамерного датчика

Практическая реализация двухкамерного термокаталитического датчика наиболее просто может быть осуществлена на основе, описанной в [29] термогруппы с двойным диффузионным фильтром, конструкция которой приведена на рис. 6.3. Такие термогруппы серийно изготавливаются на ОАО «Красный металлист» и используются в аппаратуре газового контроля.

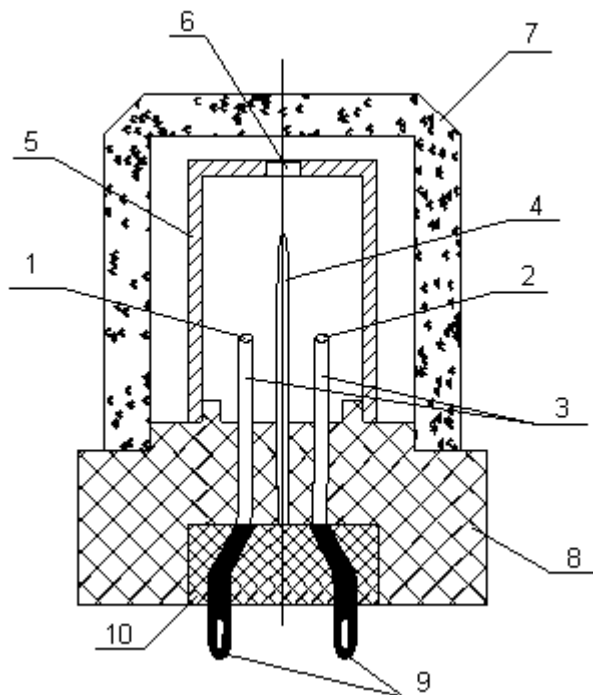


Рис. 6.3. Термогруппа с двойным диффузионным фильтром: 1, 2 – рабочий и компенсационный элементы; 3 – держатели; 4 – перегородка; 5 – стакан; 6 – калиброванное отверстие; 7 – металлокерамический фильтр; 8 – диэлектрическое основание; 9 – выводы; 10 – компаунд.

Отличие термогруппы, приведенной на рис. 6.3, от известных заключается в том, что металлокерамический фильтр выполнен с несколько увеличенными размерами, а внутри этого фильтра расположен полый стакан с калиброванным отверстием. Диаметр отверстия выполнен таким, чтобы его диффузионная проводимость $\gamma_{от} \ll \gamma_{\phi}$. В этом случае суммарное диффузионное сопротивление определяется сопротивлением отверстия, а внешний фильтр выполняет только функции защиты при работе в загрязненной среде, причем загрязнение этого фильтра практически не влияет на суммарное диффузионное сопротивление. Кроме того, при обеспечении высокой точности изготовления стакана и отверстия, обеспечивается постоянство диффузионного сопротивления всех термогрупп и равенство выходных напряжений измерительного моста.

На базе описанной термогруппы возможна реализация нескольких вариантов выполнения двухкамерных датчиков. Первый вариант заключается в раздельном расположении чувствительных элементов (рис. 6.4). В этом случае ра-

бочий и сравнительный термоэлементы размещаются в отдельных стаканах, герметично закрепленных на диэлектрическом основании с двумя держателями.

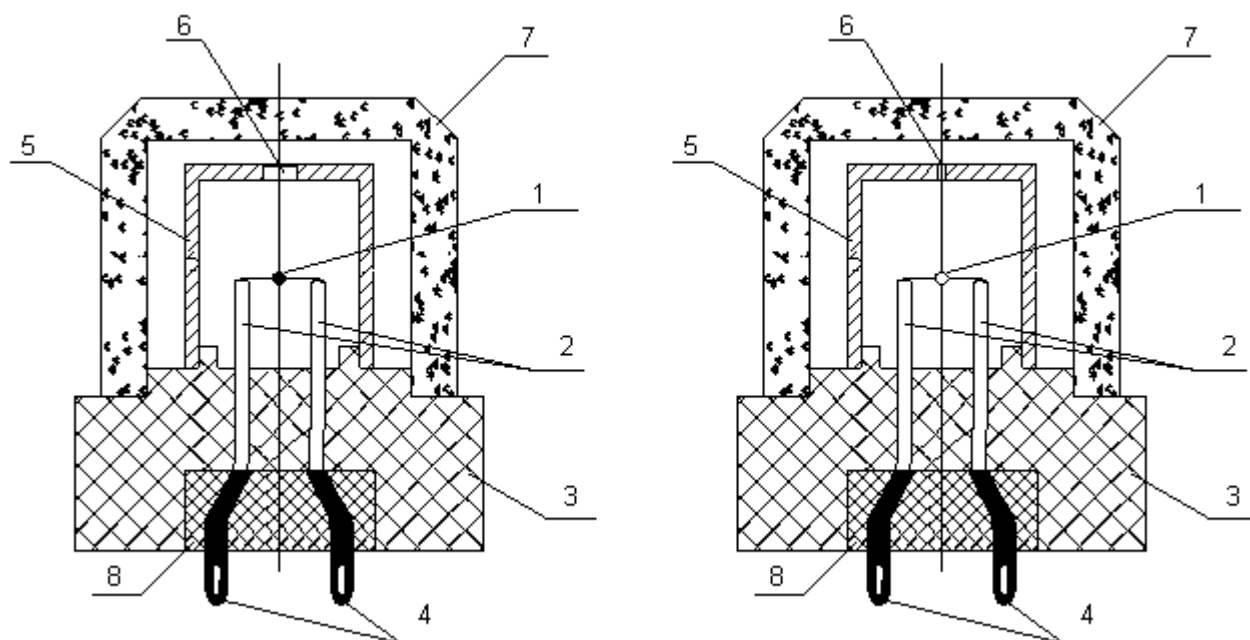


Рис. 6.4. Двухкамерный термокаталитический датчик с раздельным расположением чувствительных элементов: 1 – чувствительные элементы; 2 – держатели; 3 – диэлектрическое основание; 4 – выводы; 5 – стакан; 6 – калиброванное отверстие; 7 – металлокерамический фильтр; 8 – компаунд.

Стаканы имеют калиброванные отверстия различного диаметра и защищаются от воздействия загрязненной среды отдельными металлокерамическими фильтрами. Диаметр калиброванных отверстий выбирается таким, чтобы диффузионный поток анализируемой среды к рабочему элементу был существенно больше потока к сравнительному элементу, т.е. $d_p \gg d_c$.

Раздельное расположение чувствительных элементов позволяет полностью исключить их взаимное тепловое влияние и, кроме того, дает возможность производить индивидуальный подбор термоэлементов в пары по их вольтамперным характеристикам [84]. Недостатком такого выполнения датчика является невозможность его применения в существующих серийно выпускаемых газоанализаторах без конструктивного изменения последних. Поэтому, как альтернативное решение целесообразно рассмотреть вариант двухкамерного термокаталитического датчика с расположением чувствительных элементов под одним фильтром (рис. 6.5). Данный двухкамерный датчик отличается от известного датчика с двойным диффузионным фильтром только конструктивным выполнением стакана. Стакан имеет изолирующую перегородку, которая разделяет газовые камеры на две изолированные друг от друга части. Доступ анализируемой среды в газовые камеры осуществляется через калиброванные отверстия, диаметр которых подобран так, чтобы диффузионный поток к рабоче-

му элементу был значительно больше потока к сравнительному элементу, т.е. $d_p \gg d_c$.

Такое выполнение двухкамерного датчика позволяет использовать его в серийной аппаратуре вместо существующих датчиков без внесения каких либо конструктивных изменений. Наличие изолирующей перегородки снижает взаимное тепловое влияние элементов друг на друга. В то же время при таком исполнении датчика не позволяет производить индивидуальный подбор термоэлементов в пары по их вольтамперным характеристикам и поэтому для уменьшения ухода нуля обусловленного изменением неконтролируемых параметров анализируемой среды в данном случае целесообразно производить дополнительную термическую балансировку элементов, в соответствии с методикой описанной в [84].

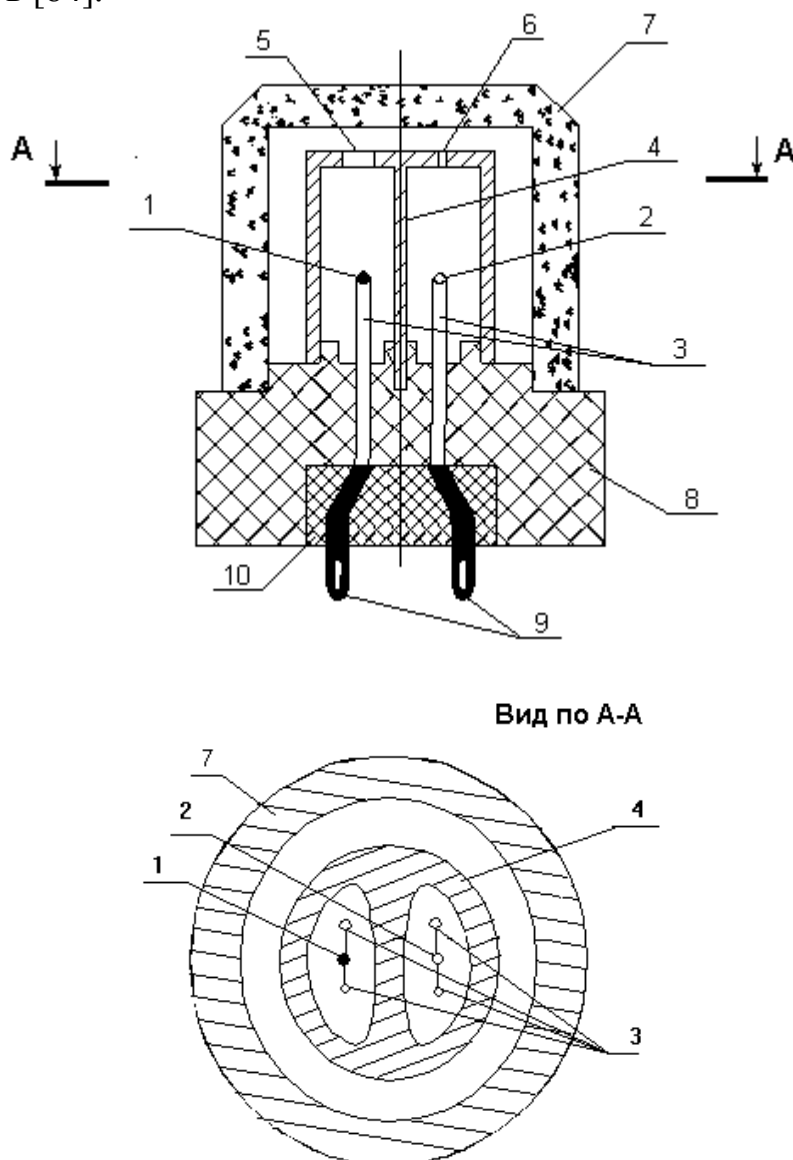


Рис. 6.5. Двухкамерный термокатализический датчик с расположением чувствительных элементов под одним металлокерамическим фильтром: 1, 2 – рабочий и компенсационный элементы; 3 – держатели; 4 – стакан с изолирующей перегородкой; 5,6 – калиброванные отверстия; 7 – металлокерамический фильтр; 8 – диэлектрическое основание; 9 – выводы; 10 – компаунд.

Выходные характеристики предложенных датчиков зависят от выбранных температурных режимов чувствительных элементов и величины газодиффузионных сопротивлений, определяющих скорость подвода реагирующих компонентов к этим элементам. Температурные режимы термоэлементов в двухкамерном датчике не отличаются от режимов работы в однокамерном датчике и при выборе этих режимов целесообразно руководствоваться рекомендациями, приведенными в [29]. Скорость подвода реагирующих компонентов к чувствительным элементам в предложенных двухкамерных датчиках в первую очередь определяется размерами калиброванных отверстий.

Выражения, для определения выходного напряжения измерительного моста с двухкамерным термокаталитическим датчиком (6.39) и (6.44) указывают на существенную зависимость $U_{вых}$ от активности катализатора, величины питающего тока, температуры среды и других факторов. Анализ работы термокаталитических датчиков при различном уровне ограничения диффузии реагирующих компонентов в реакционную камеру, выполненный в [29], показывает, что наибольшее влияние указанных факторов наблюдается при слабом ограничении диффузии, то есть в том случае, когда диффузионная проводимость фильтра больше или сопоставима с эффективной диффузионной проводимостью рабочего элемента. По мере уменьшения γ_ϕ влияние отмеченных факторов уменьшается, и начинают проявляться автостабилизационные свойства датчика. При значительном ограничении диффузии реагирующих компонентов в реакционную камеру, например, при применении двойного диффузионного фильтра с малым калиброванным отверстием, когда $\gamma_\phi \ll \gamma_\varepsilon$, выходное напряжение моста определяется в основном размерами калиброванного отверстия и практически не зависит от температуры окружающей среды, давления, активности катализатора:

$$U_{вых} = b_3 \beta Q_{мно} C_{ма} D_{мо} \frac{S}{l}, \quad (6.45)$$

где b_3 – коэффициент, в рабочем диапазоне токов через термогруппу практически постоянный для данного вида термоэлементов, °C/A (для термоэлементов серийных датчиков, выполненных с платинового микропровода диаметром $d_{пр}=30$ мкм при $t_2=30^\circ\text{C}$, $b_3=267^\circ\text{C/A}$; при $t_2=70^\circ\text{C}$, $b_3=268,8^\circ\text{C/A}$); S – площадь калиброванного отверстия, м²; l – длина отверстия, м.

Независимость выходного напряжения измерительного моста от давления при измерении объемной концентрации газа, в данном случае объясняется обратным характером связи $D_{мо}$ и массовой концентрации $C_{ма}$ от величины давления.

Обеспечить выполнение условия $\gamma_\phi \ll \gamma_\varepsilon$, из-за значительного снижения выходного напряжения, невозможно, так как при этом возникают дополнительные погрешности измерения из-за нестабильности измерительных цепей преобразователей и погрешности связанные с изменением пространственного расположения датчика. Экспериментально установлено [29], что при применении се-

рийных датчиков для обеспечения погрешности измерения 0,2 об.% диффузионная проводимость отверстия должна составлять $\gamma_{отв}=(0,1 \div 0,25)\gamma_э$. Величина выходного напряжения моста в этом случае составляет $(4 \div 10)$ мВ/об. %.

При $\gamma_{отв}>0,2\gamma_э$ на содержание метана в реакционной камере заметное влияние оказывает активность рабочего элемента, а это в свою очередь может привести к изменению диффузионного потока метана и величины выходного напряжения моста.

Учитывая изложенное зададимся величиной диффузионная проводимость отверстия камеры с рабочим термоэлементом на уровне $\gamma_{отв}=0,25\gamma_э$, что с учетом типичного значения эффективной диффузионной проводимости элемента серийных датчиков при номинальном токе [29] составляет $\gamma_{отв}=0,3 \cdot 10^{-7}$ м³/с.

Параметры отверстия определим исходя из первого закона Фика, согласно которому в стационарном случае [85]

$$Q_m = -D_m \frac{dC_m}{dl} S, \quad (6.46)$$

где D_m – коэффициент диффузии метана в воздухе, м²/с.

Приняв

$$\frac{dC_m}{dl} = \frac{C_{ма} - C_{мк}}{l},$$

имеем

$$Q_m = -D_m \frac{S}{l} (C_{ма} - C_{мк}). \quad (6.47)$$

Таким образом

$$\gamma_\phi = D_m \frac{S}{l}. \quad (6.48)$$

Задавшись толщиной стенки камеры 1 мм, из (6.48) получим значение площади $S=15$ мм², что соответствует отверстию диаметром $d = 4$ мм.

При той же толщине стенки камеры со сравнительным элементом для выполнения условия (6.43) принимаем диаметр калиброванного отверстия в стенке этой камеры $d = 0,5$ мм.

6.4. Обоснование конструктивных и технологических параметров датчиков метана

Термокаталитические датчики метана, используемые в разнообразных приборах контроля, отличаются своим конструктивным исполнением и параметрами чувствительных элементов, в том числе их размерами, формой, сопротивлением, энергопотреблением и др. Вопросы оптимизации параметров чувствительных элементов до настоящего времени в достаточной мере не изучены. Не исчерпаны также возможности совершенствования датчиков метана. Поэтому для улучшения параметров газоанализаторов необходимо обоснование оптимальных параметров чувствительных элементов термокаталитических датчи-

ков метана, что предпочтительно осуществлять с использованием методов планирования эксперимента.

Одной из важнейших задач по совершенствованию чувствительных элементов датчиков является оптимизация конструктивных решений и технологии изготовления для уменьшения потребляемой мощности и повышения стабильности, метрологических и других характеристик.

В задаче оптимизации в общем случае можно выделить ряд основных этапов [86]:

системный анализ задачи измерения;

системный анализ задачи оптимизации измерительно-информационной системы (ИИС) или её элементов;

обоснование исходных данных для синтеза ИИС или её элементов;

эвристический синтез ИИС;

построение математической модели ИИС;

выбор метода оптимизации;

определение критерия оптимизации ИИС или её элементов.

Приведенная последовательность этапов оптимизации несколько условна и может меняться исходя из конкретной задачи оптимизации.

Системный анализ задачи измерения содержания метана в атмосфере достаточно полно изложен в известных источниках [29, 30, 86]. Системный анализ задачи оптимизации проводится посредством анализа влияния на чувствительные элементы их конструктивных особенностей (рис. 3.4).

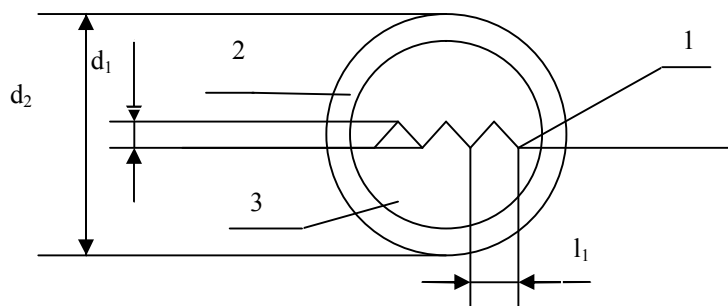


Рис 6.4. Конструкция чувствительного элемента термокаталитического датчика: 1 - спираль из платиновой проволоки; 2 – слой катализаторов; 3 – слой γ -оксида алюминия

Для чувствительного элемента датчика можно выделить следующую совокупность основных конструктивных и технологических параметров, влияющих на характеристику датчика:

число витков спирали $W = X_1$;

диаметр витка спирали $d_1 = X_2$;

шаг витка спирали $l_1 = X_3$;

количество слоев γ -оксида алюминия из которого сформирован шарик вокруг спирали $n_1 = X_4$;

диаметр шарика $d_2 = X_5$;

количество слоев катализаторов наносимых на шарик $n_2 = X_6$;

диаметр и длинна газообменного отверстия $d_3 = X_7$, $l_2 = X_8$ при конструкции датчика в соответствии с [87];

гранулометрический состав суспензии из γ -оксида алюминия для формирования шарика X_9 ;

текучесть суспензии из γ -оксида алюминия X_{10} ;

температура термообработки каждого слоя суспензии наносимого на спираль $t_1 = X_{11}$;

температура термообработки каждого слоя катализатора наносимого на шарик $t_2 = X_{12}$.

Обоснование исходных данных для синтеза оптимального чувствительного элемента проводим на основе более детального анализа конструкций чувствительных элементов разных производителей (ОАО «Красный металлист», ЧП «Укрсенсор» (Украина), ЗАО «Электроточприбор» (Россия)). Исходя из анализа, определяется диапазон возможных изменений указанных выше значений конструктивных и технологических параметров в ходе экспериментальной оптимизации: $X_1 = W = (6 \div 12)$ вит; $X_2 = d_1 = (0,15 \div 0,3)$ мм, $X_3 = l_1 = (30 \div 40)$ мкм, $X_4 = n_1 = (4 \div 8)$ слоев, $X_5 = d_2 = (0,25 \div 0,4)$ мм, $X_6 = n_2 = (6 \div 12)$ слоев, $X_7 = l_2 = (0,5 \div 2,5)$ мм, $X_8 = d_3 = (1 \div 2,5)$ мм, $X_9 = (|-10| \div |-40|)$ мкм, $X_{11} = t_1 = (500 \div 1000)^\circ\text{C}$, $X_{12} = t_2 = (350 \div 600)^\circ\text{C}$.

Большое значение для экспериментального определения оптимальных конструктивных и технологических параметров для производства чувствительных элементов является обоснованный выбор критерия (или совокупности критериев) оптимизации K . С точки зрения известных подходов для решения этой задачи возможно применения эвристического синтеза, основывающегося на коллективном опыте разных разработчиков, инженерной инструкции, опыте производства и эксплуатации [8]. Исходя из этого для поставленной задачи может быть принят комплексный критерий оптимизации K_0 чувствительных элементов. В частности, это может быть минимальная потребляемая мощность, независимость выходного сигнала с датчика от изменения напряжения питания от U_{min} до U_{max} , чувствительность не менее какого-то заданного значения и др.

Как видно критерий оптимизации чувствительного элемента – многофакторная функция, зависящая как минимум от 8 конструктивных (внутренних) и 4-х технологических (внешних) параметров. Поэтому весьма важным в этом случае становится вопрос методики проведения экспериментальной оптимизации. Проведение классического эксперимента, когда поочередно меняется один из факторов а остальные фиксируются, требует больших затрат времени без гарантии достижения максимально возможного успеха при оптимизации.

Наиболее приемлемыми для многофакторного эксперимента являются методы оптимизации, основанные на математических методах планирования эксперимента [86].

Среди этих методов, наиболее распространены метод крутого восхождения по поверхности отклика, метод движения по градиенту, различные модификации симплекс метода, и в частности, симплекс-метод планирования эксперимента с переменным размером симплекса, как наиболее приемлемого для оптимизации объектов в многомерном факторном пространстве варьируемых переменных [89].

В соответствии с выбранным методом для указанного выше набора внутренних параметров чувствительного элемента ($W, d_1, L_1, n_1, L_2, d_2, n_2, d_3, X_9$) и внешних параметров (X_{10}, t_1, t_2) определяют основной уровень параметров

$$X_i^0 = \frac{X_{i \max} + X_{i \min}}{2} \quad (3.49)$$

и интервал их варьирования:

$$\Delta X_i = X_i^0 - X_{i \min}. \quad (3.50)$$

Рассчитанные в соответствии (3.49) и (3.50) значения основных уровней и интервалов варьирования конструктивных и технологических параметров используем для расчёта регулярной конфигурации из $(m+1)$ точек правильного симплекс – плана проведения экспериментальной оптимизации.

План исходной серии $(m+1)$ экспериментов в кодированных единицах приведён в [86]. Для перевода плана эксперимента в натуральных параметрах X_i вычисляют:

$$X_i = V_i \Delta X_i + X_i^0, \quad (3.51)$$

где V_i – i -е значение параметра в точке эксперимента в кодированном виде. Значение V_i приведены в [86], а результаты расчёта значений X_i^0 , ΔX_i , X_i для плана эксперимента приведены соответственно в таблицах 3.1-3.3.

Таблица 3.1

Значения величин X_i^0 при проведении эксперимента

X_1^0	X_2^0	X_3^0	X_4^0	X_5^0	X_6^0	X_7^0	X_8^0	X_9^0	X_{10}^0	X_{11}^0	X_{12}^0
ВИТК.	мм	мкм	слоев	мм	слоев	мм	мм	мкм	мм/с	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
9	0,225	35,0	6	0,325	9	1,75	1,5	-25		750	475

Таблица 3.2

Значения величин ΔX_i при проведении эксперимента

ΔX_1	ΔX_2	ΔX_3	ΔX_4	ΔX_5	ΔX_6	ΔX_7	ΔX_8	ΔX_9	ΔX_{10}	ΔX_{11}	ΔX_{12}
ВИТК.	мм	мкм	слоев	мм	слоев	мм	мм	мкм	мм/с	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
3,0	0,075	5,0	2	0,075	3	0,07	0,5	-10		250	75

По конструктивным и технологическим параметрам, приведённым в табл. 3.3, изготавливают $(m+1)$ серий из 20 рабочих и сравнительных элементов датчика метана. Изготовление ведётся на оборудовании и по технологическим процессам, применяемым на ОАО «Красный металлист» (г. Конотоп) для серийного производства. Сравнительные чувствительные элементы отличаются от рабочих только отсутствием на их поверхности катализатора. В соответствии с принятым технологическим процессам из чувствительных элементов собирают датчики метана, которые после тренировки в метановоздушных смесях испытываются на установке и по методике приведённой в [29], определяют при этом номинальную потребляемую мощность, чувствительность и изменение выходного напряжения с датчика при изменении напряжения питания от U_{\max}

до U_{min} (например от 2 до 1,7 В для датчиков метана, применяемых в переносных приборах).

Таблица 3.3

Значения величин X_i при проведении эксперимента

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
ВИТК.	ММ	МКМ	СЛОЕВ	ММ	СЛОЕВ	ММ	ММ	МКМ	ММ/С	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
12	0,247	36	6	0,345	9	1.82	1,583	-26		765	482
6	0,247	36	6	0,345	9	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,182	36	6	0,345	9	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	40	6	0,345	9	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	4	0,345	9	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,291	9	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	7	1.82	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,583	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	0,917	-26		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-16		765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-25	-3	765	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-25		575	482
9	0,225	35	6	0,325	9	1,75	1,5	-25		750	402

Для каждой серии ($m+1$) датчиков вычисляют среднее значение чувствительности

$$\bar{U}_{вых} = \frac{\sum_{n=1}^{20} U_{выхi}}{20}, \text{ мВ}/\% \text{CH}_4, \quad (3.52)$$

потребляемой мощности

$$\bar{P}_{потр} = \frac{\sum_{n=1}^{20} P_i}{20}, \text{ Вт}, \quad (3.53)$$

изменения выходного сигнала при изменении U_{nut} от U_{max} до U_{min}

$$\Delta \bar{U}_{вых} = \frac{\sum_{n=1}^{20} \Delta U_{выхi}}{20}, \text{ мВ}. \quad (3.54)$$

По результатам расчётов определяется серия датчиков, имеющая худшие комплексные критерии оптимизации и из матрицы данных табл. 3.3 вычёркивается строка, соответствующая конструктивным и технологическим параметрам худшей серии датчиков. По результатам экспериментальной оптимизации и расчётов, наихудшим по комплексному критерию оптимизации K_0 является серия датчиков с конструктивными и технологическими параметрами соответствующие первой строке табл. 1.1. Она исключается из таблицы.

По оставшимся в табл. 3.3 данным рассчитываются в соответствии [86] конструктивные и технологические параметры для изготовления $(m+2)$ -ой серии чувствительных элементов:

$$X_i^1 = 2\bar{X}_1 - X_{ik}, \quad (3.55)$$

где \bar{X}_1 - среднее значение i -го конструктивного (технологического) параметра за исключением наихудшего по критерию оптимизации X_i параметра;

В результате расчетов согласно (3.55) получаем значения конструктивных и технологических параметров для $(m+2)$ -ой серии чувствительных элементов: $W = X_1 = 8,75$ вит ≈ 9 вит; $d_1 = X_2 = 0,223$ мм; $l_1 = X_3 = 35,2$ мкм; $n_1 = X_4 = 5,98$ слоев ≈ 6 слоев; $d_2 = X_5 = 0,328$ мм; $n_2 = X_6 = 8,83$ слоя ≈ 9 слоев; $d_3 = X_7 = 1,7$ мм; $l_2 = X_8 = 1,5$ мм; $X_9 = |-24,9|$ мкм; $t_1 = X_{11} = 748$ °C; $t_2 = X_{12} = 475$ °C;

Полученные данные реализуют при изготовлении $(m+2)$ серии чувствительных элементов изготавливают из них $(m+2)$ -ю серию датчиков и по выше описанной процедуре определяют комплексный критерий K_0 оптимизации изготовленной серии.

Дальнейшая оптимизация, если критерий оптимизации $(m+2)$ -ой серии датчиков выше полученных ранее, может идти по процедуре описанной выше до получения приемлемого или заданного критерия оптимизации. Однако в этом случае возможен выход на локальный, не лучший оптимум параметров датчиков. Поэтому, после сопоставления критериев $(m+2)$ -ой серии датчиков с рассчитанными ранее, возможны два варианта ведения экспериментальной оптимизации. Если $(m+2)$ -ой опыт удачен, т.е., когда критерий оптимизации $(m+2)$ -ой серии датчиков $K_0^{(m+2)}$ больше максимального значения критерия оптимизации K'_0 для серий датчиков изготовленных по параметрам согласно табл. 3.3, т.е. если $K_0^{(m+2)} > K'_{0max}$ производят расширение симплекса, для чего определяют параметры X_i^2 для изготовления $(m+3)$ -ей серии чувствительных элементов в соответствии с [86]

$$X_i^2 = 3\bar{X}_1 - 2X_{ik}. \quad (3.56)$$

Если $K_0^{(m+2)} < K_{0max}$, то производят сжатие симплекса. Для чего определяют параметры X_i^3 для изготовления $(m+3)$ -ей серии чувствительных элементов:

$$X_i^3 = 0,5\bar{X}_1 - 0,5X_{ik}. \quad (3.57)$$

Эксперимент по оптимизации по описанной методике ведется до тех пор, пока симплекс не начнет вращаться вокруг точки, давшей максимальное значение критерия оптимизации. Для определения возможности улучшения критерия оптимизации рекомендуется [86,88] кроме описанных процедур использовать следующие приемы: исключение исходной матрицы табл. 3.3 строки, давшей значение $K_0 > K_{0min}$, образование нового правильного симплекса меняя исходный порядок внешних и внутренних параметров, образование набора из $2m$ версий комплекс-метода и др.

В процессе экспериментальной оптимизации получены следующие значения внутренних и внешних параметров для встраиваемых измерителей и анализаторов метана: число витков спирали $W = (7 \div 8)$ вит.; диаметр витка спира-

ли $d_1=(0,18\div 0,25)$ мм; шаг витка спирали $l_1=(28\div 35)$ мкм; количество слоев γ -окси алюминия $n_1=(6\div 9)$ слоев; диаметр шарика $d_2=(0,25\div 0,33)$ мм; количество слоев катализатора $n_2=(6\div 10)$ слоев; диаметр газообменного отверстия $d_3=(0,8\div 2,0)$ мм; температура термообработки суспензии $t_1=(550\div 990)^{\circ}\text{C}$; температура термообработки катализатора $t_2=(450\div 650)^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальная проверка датчиков, изготовленных по полученным значениям внутренних и внешних параметров чувствительных элементов, в переносных и встраиваемых приборах, показала существенное повышение основных технических характеристик указанных приборов, уменьшение брака в процессе изготовления датчиков.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложена методика одновременной экспериментальной оптимизации конструктивных и технологических параметров чувствительных элементов и датчика горючих газов. Выбор оптимизируемых параметров осуществлен на основе ранжирования влияющих факторов на характеристики чувствительных элементов и датчиков изготовленные из них.

Дальнейшая оптимизация чувствительных элементов может проводиться по предложенной методике, для другой группы влияющих факторов, значений их основных уровней и интервала варьирования этих факторов. Предложенный подход может быть применен при оптимизации датчиков, построенных на других принципах измерения, электрических схем, режимов их работы, конструктивного исполнения различных электротехнических, электронных устройств и систем, алгоритмов их функционирования и иных задач. Предложенная методика оптимизации более чем на порядок сокращает длительность проведения экспериментальной оптимизации чувствительных элементов при достижении экстремума принятых критериев оптимизации. Методика позволяет оптимизировать чувствительные элементы и конструкции датчика по другим критериям оптимизации: стабильности выходного сигнала во времени, минимальная чувствительность к влияющим факторам (температура, давление, влажность, скорость воздушного потока, избирательность, потребляемую мощность и др.).

Выводы

Выполненные в настоящей главе исследования по обоснованию способов контроля содержания метана, обеспечивающих работоспособность газоанализаторов при аварийных загазированиях шахт позволяют сделать следующие выводы.

1. Обеспечить работоспособность анализаторов метана при аварийных загазированиях шахт можно путем использования различных тепловых режимов чувствительных элементов в термокаталитических датчиках. При выборе температуры рабочего элемента 400°C , а температуры сравнительного ниже 300°C фактически исключается карбонизация обоих элементов, обеспечивается стабильность нуля и чувствительности датчика, а низкая температура сравнительного элемента исключает возможность окисления на нем метана и горючих

компонентов, характеризующихся низкой температурой воспламенения, при аварийных загазированиях горных выработок шахт.

2. Обеспечить указанные тепловые режимы чувствительных элементов можно путем выполнения термоэлементов с разными сопротивлениями, разными размерами поверхности или путем шунтирования сравнительного термоэлемента существующего серийно выпускаемого симметричного термокаталитического датчика.

3. При шунтировании сравнительного элемента существующего серийно выпускаемого симметричного термокаталитического датчика измерительный мост является термически несбалансированным при любом режиме его питания, поэтому такой вариант решения может быть реализован только при дополнительном введении в анализатор датчика температуры и корректировки нуля анализатора за показаниями этого датчика.

4. Температурная стабильность моста с термокаталитическим датчиком, отличающегося применением термоэлементов с одинаковым начальным сопротивлением и разной площадью поверхности, обеспечивается при условии симметрирования измерительного моста путем включения добавочного резистора в ветвь моста со сравнительным элементом и его питания от источника стабильного тока. При работе моста в режиме стабилизации напряжения на рабочем элементе температурная стабильность моста достигается при введении в ветвь моста со сравнительным термоэлементом добавочного резистора, сопротивление которого сопоставимо с начальным сопротивлением термоэлемента, что приводит к существенной несимметричности моста и значительной дополнительной потере мощности на добавочном резисторе.

5. При применении терморезисторов с одинаковой площадью поверхности, но с различным начальным сопротивлением температурная стабильность моста с термокаталитическим датчиком обеспечивается в режиме стабилизации напряжения на рабочем элементе при условии симметрирования моста путем введения дополнительного сопротивления в плечо моста со сравнительным элементом. В режиме питания моста от источника стабильного тока стабильность моста достигается при введении в ветвь моста со сравнительным термоэлементом добавочного резистора, сопротивление которого незначительно, что дает возможность несколько снизить мощность, потребляемую датчиком, однако измерительный мост при этом остается несимметричным.

6. При применении двухкамерных датчиков существует возможность раздельного управления величиной диффузионной проводимости фильтров при одновременном сохранении электротепловой аналогии элементов. Для обеспечения высокой чувствительности и малой постоянной времени анализаторов диффузионная проводимость фильтра камеры датчика, в которой установлен рабочий элемент, должна быть соизмеримой с эффективной диффузионной проводимостью рабочего элемента, а диффузионная проводимость фильтра камеры датчика, в которой установлен сравнительный элемент, может быть принята на несколько порядков меньше, чем у первой камеры.

7. Выполнение термокаталитических датчиков двухкамерными с диффузионной проводимостью фильтра камеры, в которой установлен сравнительный

элемент значительно меньшей диффузионной проводимости фильтра камеры с рабочим элементом, позволяет существенно улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики газоанализаторов, исключить случаи неоднозначной их работы после длительной эксплуатации и при наличии в газовых смесях компонентов, способных окисляться на сравнительном элементе при температуре предварительного разогрева элементов.

8. Предложена методика одновременной экспериментальной оптимизации конструктивных и технологических параметров чувствительных элементов и датчика горючих газов, которая позволила выбрать оптимальные параметры анализаторов метана на основе ранжирования влияющих факторов на характеристики чувствительных элементов и датчиков.

ГЛАВА 7. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ МЕТАНА ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

7.1. Лабораторные исследования датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов

Для подтверждения достоверности результатов теоретических исследований, изложенных в главе 4, проведены лабораторные исследования датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов.

Для исследований были отобраны пять термически сбалансированных серийных однокамерных термокаталитических датчиков от аппаратуры АТ-3-1, выпускаемой ОАО «Красный металлист» у которых сравнительный элемент в последствии был шунтирован постоянным резистором с $R_{ш} = 20$ Ом и по пять датчиков с термоэлементами одинакового начального сопротивления, отличающихся площадью поверхности, и с термоэлементами одинакового размера, отличающихся величиной начального сопротивления, специально изготовленных для проведения исследований.

Программа испытаний предусматривала снятие зависимостей $U_{вых} = f(C)$ в диапазоне изменения концентрации метана от 0 до 100 об.% и оценку температурной стабильности нуля измерительного моста при различных режимах его питания, а также исследование работоспособности датчиков в многокомпонентных газовых смесях.

Снятие зависимостей $U_{вых} = f(C)$ проводились на экспериментальной установке, описанной во второй главе, при температуре воздуха в помещении $25 \pm 2^\circ\text{C}$ в соответствии с методикой, приведенной в третьей главе. Оценка температурной стабильности нуля измерительного моста проводилась в соответствии с методикой, изложенной в [54, 74]. Исследование работоспособности датчиков в многокомпонентных газовых смесях осуществлялось в соответствии с методикой, приведенной в главе 3.3.

Вначале каждого цикла испытаний после 15 минутного прогрева датчиков путем изменения режима питания датчиков устанавливалась температура первоначального разогрева чувствительного элемента 400°C и определялась температура сравнительного элемента в воздухе (табл.7.1). Тепловые режимы работы определялись расчетным путем, исходя из значений начального сопротивления элементов, величины тока через элементы и падения напряжения на них. Тепловые режимы элементов и чувствительность датчиков при измерении дозрывных концентраций метана, в сопоставлении с серийными датчиками, приведены в табл. 7.1.

Более высокая чувствительность датчиков с увеличенной площадью поверхности сравнительного элемента и с уменьшенным сопротивлением сравнительного элемента при стабилизации напряжения на рабочем элементе объясняется тем, что термическая балансировка моста в этих случаях достигается при введении в ветвь со сравнительным элементом дополнительных сопротивлений с относительно большим сопротивлением (см. табл. 7.2). Это приводит к

росту напряжения питания моста, его чувствительности, однако при этом соответственно растет и энергопотребление датчика.

Таблица 7.1

Тепловые режимы элементов и чувствительность датчиков

Тип датчика	Температура начального разогрева элементов, °С		Чувствительность, мВ/об.% CH ₄	
	рабочего	сравнительного	при питании термогруппы стабильным током	при стабилизации напряжения на рабочем элементе
Серийный датчик	400	396 - 403	13,4±0,2	12,1±0,2
Серийный датчик с шунтированием сравнительного элемента	400	295 - 302	10,6±0,2	9,5±0,2
С увеличенной площадью поверхности сравнительного элемента	400	296 - 312	13.5±0,3	16,0±0,2
С уменьшенным сопротивлением сравнительного элемента	400	295 - 300	10.8±0,2	12,3±0,2

Таблица 7.2

Параметры питания измерительных мостов и добавочных сопротивлений

Тип датчика	Величина добавочного сопротивления, Ом		Среднее начальное напряжение на мосте, В	
	при $I_s = const$	при $U_p = const$	при $I_s = const$	при $U_p = const$
Серийный датчик	-	-	2,17	2,17
Серийный датчик с шунтированием сравнительного элемента	-	-	1,81	1,81
С увеличенной площадью поверхности сравнительного элемента	1,6	4,5	2,16	2,74
С уменьшенным сопротивлением сравнительного элемента	0,2	1,3	1,88	2,18

В результате исследования зависимости $U_{вых}=f(C)$ в диапазоне изменения концентрации метана от 0 до 100 об.% было установлено, что несмотря на незначительные количественные отличия для всех вариантов датчиков характер этой зависимости идентичный. Отличительной особенностью работы всех испытанных датчиков является существенное смещение нуля измерительного моста в область отрицательных значений напряжения при 100 об.% метана. У

всех датчиков наблюдаются кратковременные провалы характеристик (до нескольких секунд) в области концентраций метана 8 – 9 об.% Провалы характеристик в области высоких концентраций метана, характерные для серийных датчиков, отсутствуют. В режиме стабилизации напряжения на рабочем элементе гистерезис показаний при изменении концентрации метана от 0 до 100 об.% и наоборот практически отсутствует. При питании измерительного моста от источника стабильного тока у некоторых датчиков наблюдается незначительный гистерезис показаний в диапазоне от 60 до 100 об.% Для примера на рис. 7.1 и 7.2 приведены полученные зависимости для термогруппы №3 с различным сопротивлением элементов при стабилизации напряжения на рабочем элементе и при питании измерительного моста от источника стабильного тока.

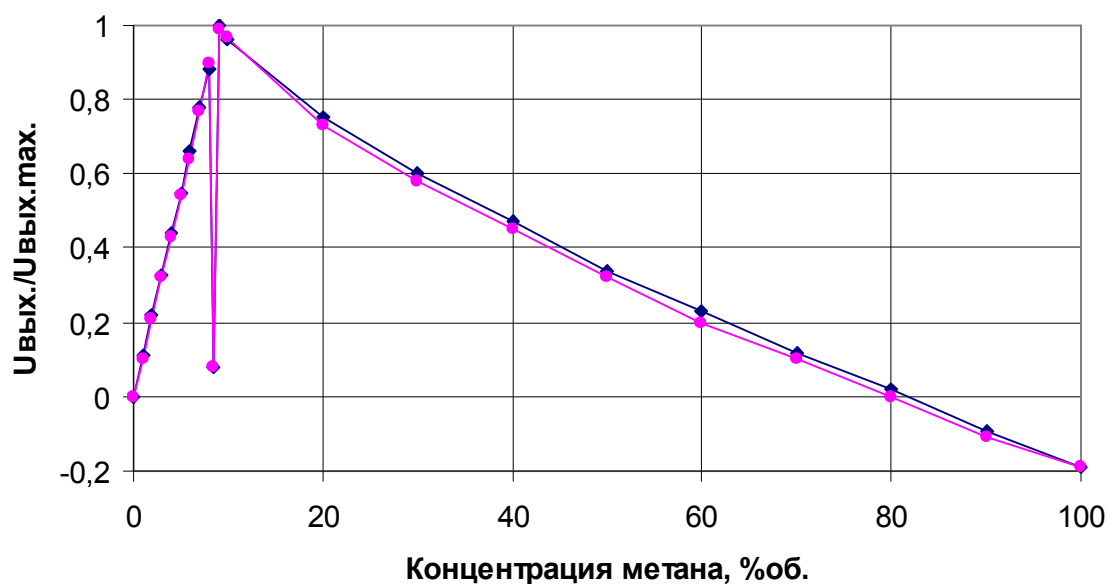


Рис. 7.1. Зависимость $U_{\text{вых.}}=f(C)$ для термогруппы №3 с различным сопротивлением элементов при стабилизации напряжения на рабочем элементе и изменении концентрации метана: \blacklozenge – от 0 до 100 об.%; \bullet – от 100 до 0 об.%

Существенное смещение нуля измерительного моста в область отрицательных значений напряжения при 100 об.% метана у датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов объясняется более интенсивным охлаждением рабочего термоэлемента по сравнению со сравнительным в среде с большей теплопроводностью. Поскольку при концентрациях метана близких к 100 об.% тепловыделение на чувствительном элементе от окисления горючего практически отсутствуют, то в данной области исследуемые датчики работают фактически аналогично однокамерным термокондуктометрическим датчикам с различными тепловыми режимами элементов [77, 78]. Наличие такого смещения не позволяет без корректировки показаний анализаторов в области высоких концентраций метана обеспечить однозначность срабатывания защиты в области концентраций метана от 0 до 100 об.%. Поэтому при применении датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов для обеспечения однозначности срабатывания защиты требуется корректировка

выходного сигнала анализатора в области высоких концентраций метана. При питании измерительного моста от источника постоянного тока такая корректировка может быть осуществлена исходя из величины напряжения на сравнительном элементе, а при стабилизации напряжения на рабочем элементе – по величине тока через термогруппу. Необходимость корректировки сигнала анализатора не позволяет использовать предложенные датчики в серийной аппаратуре без ее доработки, что в определенной мере является недостатком предложенного решения.

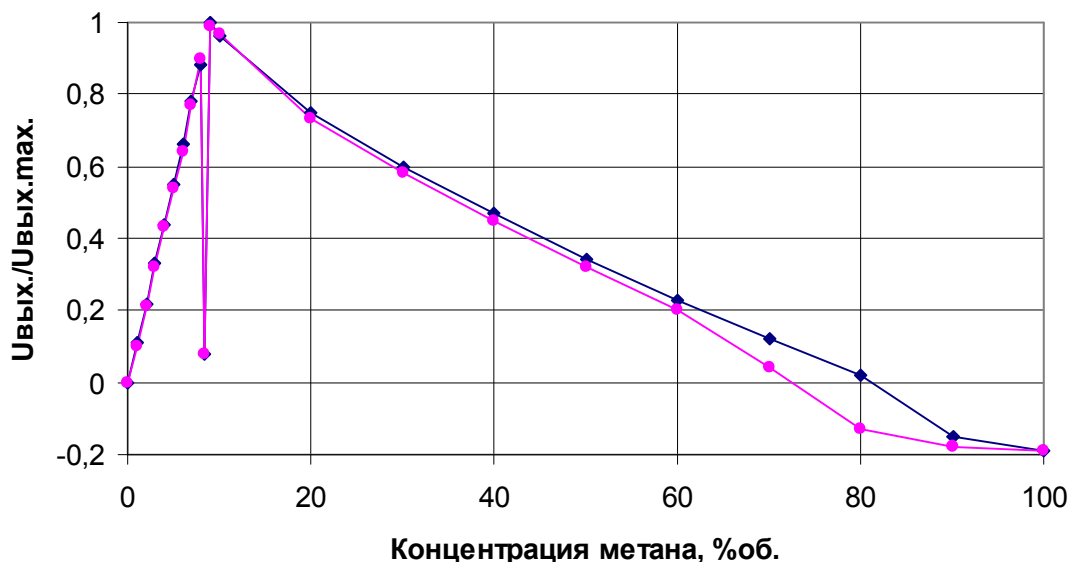


Рис. 7.2. Зависимость $U_{вых}=f(C)$ для термогруппы №3 с различным сопротивлением элементов при питании от источника стабильного тока и изменении концентрации метана: \blacklozenge – от 0 до 100 об.%; \bullet – от 100 до 0 об.%

Как было показано в [29] явление гистерезиса показаний является характерным для датчиков с низкой температурой предварительного разогрева элементов и связано с переходом реакции окисления метана на рабочем элементе с диффузионной в кинетическую область. Наличие у некоторых датчиков гистерезиса показаний в диапазоне от 60 до 100 об.% при питании измерительного моста от источника стабильного тока объясняется тем, что несмотря на выбор достаточно высокой температуры предварительного нагрева элементов (в данном случае 400 °С) за счет охлаждающего действия среды с высоким содержанием метана при постоянном токе через элементы температура рабочего элемента существенно снижается и является недостаточной для протекания реакции в диффузионной области.

Оценка температурной стабильности измерительного моста при применении датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов выполнялась при включении чувствительных элементов в мост соответственно рекомендациям раздела 3.1. При испытаниях всех датчиков ноль моста устанавливался при температуре 25 °С, а диапазон изменения температуры среды составлял ± 15 °С.

Результаты исследования серийных термокаталитических датчиков с шунтированием сравнительного элемента подтвердили наличие существенной

температурной нестабильности моста с таким датчиком. Температурный дрейф нуля измерительного моста при этом составлял от 0,4 до 0,6 мВ/°С. Типичный вид температурной зависимости нуля мостовой измерительной схемы приведен на рис 7.3.

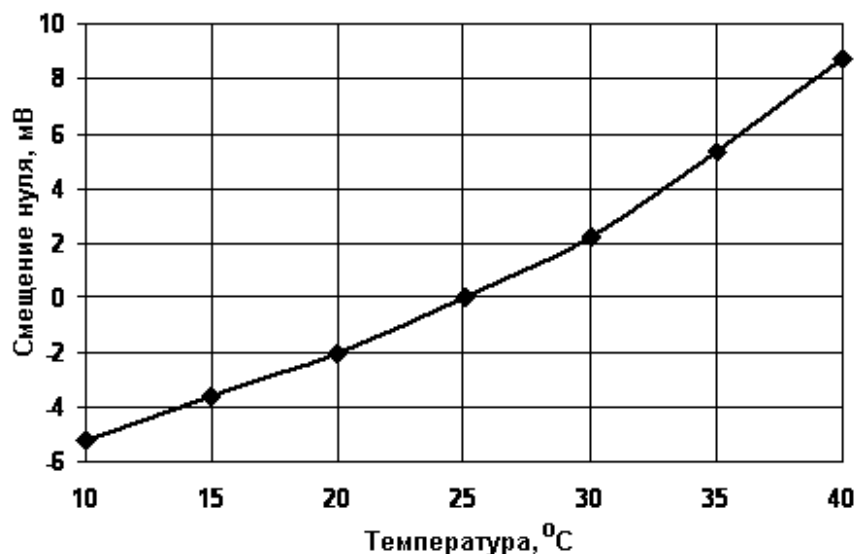


Рис 7.3. Температурная зависимость нуля мостовой измерительной схемы серийного датчика при шунтировании сравнительного элемента

С учетом чувствительности датчика (табл. 7.1) абсолютная погрешность измерения при изменении температуры в диапазоне 25 ± 15 °С при этом достигает 1 об.%, что является неприемлемым для анализаторов. При этом следует отметить, что такой датчик не может быть термически сбалансированным по методике, приведенной в [68]. Это подтверждает вывод, что такой вариант решения может быть реализован только при дополнительном введении в анализатор метана датчика температуры и корректировки нуля анализатора за показаниями этого датчика.

Оценка температурной стабильности измерительного моста при применении датчиков с термоэлементами одинакового начального сопротивления, отличающихся площадью поверхности, и с термоэлементами одинакового размера, отличающихся величиной начального сопротивления, показала, что при всех рекомендованных в разд. 3.1 режимах питания и вариантах включения датчиков в измерительный мост смещение нуля при изменении температуры в диапазоне 25 ± 15 °С не превышает 1 мВ (без дополнительной термической балансировки). Зона температурных смещений нуля мостовой измерительной схемы, полученная нами при исследовании всех датчиков, приведена на рис. 7.4 (ограниченная кривыми 1 и 2).

С учетом чувствительности датчиков (табл. 7.1) абсолютная погрешность измерения при изменении температуры в диапазоне 25 ± 15 °С при этом не превышает 0,1 об.% метана, что является приемлемым для анализаторов. Следует также отметить, что все испытанные датчики со сравнительными элементами отличающимися площадью поверхности или величиной начального сопротив-

ления, могут быть термически сбалансированы по методике, приведенной в [68], что позволяет существенно уменьшить температурный дрейф нуля.

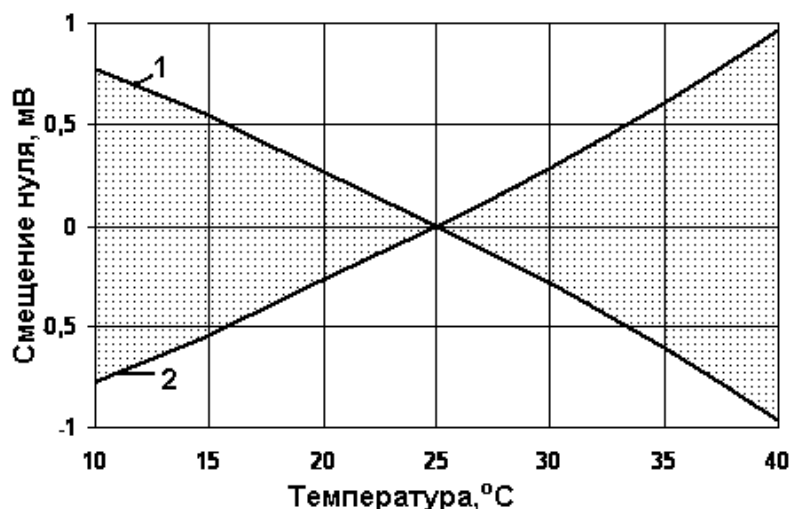


Рис. 7.4. Зона температурных смещений нуля мостовой измерительной схемы при исследовании датчиков с отличающимися геометрическими размерами или сопротивлением сравнительного элемента

На рис. 7.5 приведена температурная зависимость нуля мостовой измерительной схемы одного из датчиков со сравнительным элементом меньшего сопротивления при стабилизации напряжения на рабочем элементе без дополнительной балансировки и после такой балансировки. Как видно, проведение дополнительной термической балансировки мостовой схемы позволило на порядок уменьшить смещение нуля в диапазоне рабочих температур анализатора. В этом случае при нормировании погрешности анализатора составляющая, обусловленная температурной нестабильностью нуля измерительного моста, может не учитываться.

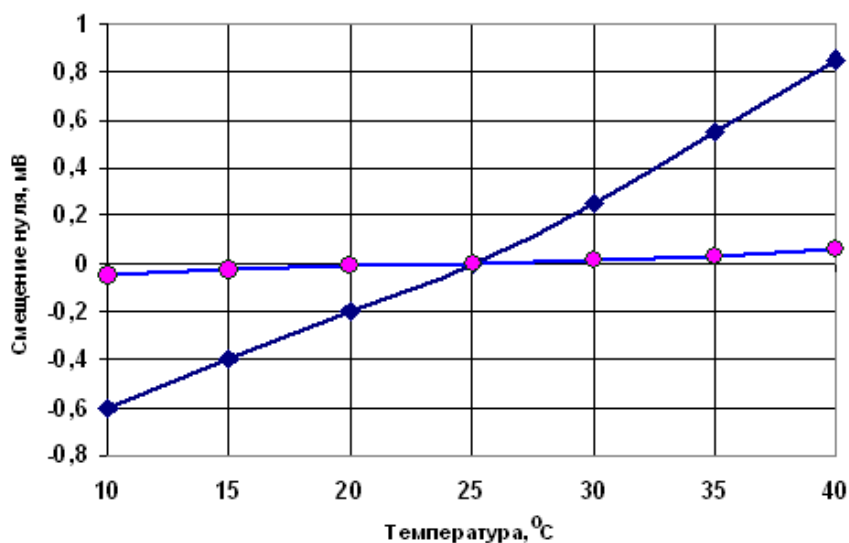


Рис 7.5. Температурная зависимость нуля мостовой измерительной схемы датчика №3 со сравнительным элементом меньшего сопротивления при стабилизации напряжения на рабочем элементе: \blacklozenge – без дополнительной балансировки; \bullet - после термической балансировки

При проведении исследований работоспособности датчиков в многокомпонентных газовых смесях были использованы три бинарные аттестованные газозоудные смеси с содержанием горючих компонентов: CH_4 – 1,63 об.%, H_2 – 1,03 об.%, CO – 0,437 об.%, а также метано-водородо-воздушная смесь с содержанием компонентов: CH_4 – 1,85 об.% и H_2 – 1,5 об.%. Данные испытаний усредненные по пяти датчикам приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Выходное напряжение измерительного моста при питании стабильным током

Вид горючего газа и его концентрация в смеси с воздухом	Выходное напряжение измерительного моста с различными видами датчиков, мВ			
	серийный датчик	с шунтированием сравнительного элемента	с увеличенной площадью поверхности сравнительного элемента	с уменьшенным сопротивлением сравнительного элемента
CH_4 – 1,63 об.%	21,8	17,3	22,0	17,6
H_2 – 1,03 об.%	7,9	12,3	15,7	12,5
CO – 0,437 об.%	0,1	1,7	2,2	1,8
CH_4 – 1,85 об.% и H_2 – 1,5 об.%	22,7	37,1	47,7	37,5

Как видно из табл. 7.3, при подаче водородозоудной смеси выходной сигнал у всех предложенных датчиков в пересчете на однопроцентную смесь в среднем в 1,14 раза выше, чем при подаче метана. При подаче смеси с содержанием оксида углерода выходной сигнал в среднем составляет 0,36 от тепловыделения по метану. При анализе метано-водородо-воздушной смеси выходной сигнал соответствовал 3,5 об.% CH_4 , т.е. несколько больше, чем суммарная концентрация метана и водорода в смеси. Такие результаты фактически совпадают выполненными в разделе 2.3 расчетами и свидетельствуют о том, что при выбранных тепловых режимах сравнительного элемента горение водорода и оксида углерода на нем не происходит, а выходной сигнал датчиков в этом случае определяется суммарной теплотворной способностью горючих компонентов с учетом их диффузионных свойств.

Из всех испытанных датчиков с учетом результатов испытаний, разброса характеристик и технологичности изготовления наиболее перспективным является датчик с термоэлементами одинакового размера и соотношением их сопротивлений $R_{0c} = 0,8R_{0p}$.

7.2. Лабораторные исследования двухкамерных термокаталитических датчиков метана

Для исследований были изготовлены пять двухкамерных термокаталитических датчиков с расположением чувствительных элементов под одним металлокерамическим фильтром (рис. 4.5).

Программа испытаний предусматривала снятие зависимостей $U_{\text{вых}}=f(C)$ в диапазоне изменения концентрации метана от 0 до 100 об.% и оценку температурной стабильности нуля измерительного моста при различных режимах его питания, а также исследование работоспособности датчиков в многокомпонентных газовых смесях.

Снятие зависимостей $U_{\text{вых}}=f(C)$ проводились на экспериментальной установке, описанной во второй главе, при температуре воздуха в помещении $25\pm 2^\circ\text{C}$ в соответствии с методикой, приведенной в главе 3.2. Оценка температурной стабильности нуля измерительного моста проводилась в соответствии с методикой, изложенной в [54, 74]. Исследование работоспособности датчиков в многокомпонентных газовых смесях осуществлялось в соответствии с методикой, приведенной в главе 3.3.

Для обеспечения сопоставимости результатов исследований, аналогично испытаниям однокамерных датчиков вначале каждого цикла испытаний после 15 минутного прогрева датчиков путем изменения их режима питания устанавливалась температура первоначального разогрева чувствительного элемента 400°C и определялась чувствительность датчиков при измерении дозрывных концентраций метана. Среднее значение чувствительности по пяти изготовленным датчикам в режиме питания термогруппы стабильным током составило 12,8 мВ/об.% CH_4 , а при стабилизации напряжения на рабочем элементе - 11,7 мВ/об.% CH_4 .

В результате исследования зависимости $U_{\text{вых}}=f(C)$ в диапазоне изменения концентрации метана от 0 до 100 об.% было установлено, что несмотря на незначительные количественные отличия для всех вариантов датчиков характер этой зависимости идентичный. В отличие от однокамерных датчиков с различными тепловыми режимами элементов существенного смещения нуля измерительного моста в область отрицательных значений напряжения при 100 об.% метана не наблюдается. По этому показателю двухкамерные датчики являются идентичными серийным однокамерным датчикам, результаты исследования которых, приведены в [29]. Среди исследованных двухкамерных датчиков один датчик имел при 100 об.% метана незначительное смещение нуля в область положительных значений выходного напряжения, в одного датчика смещение практически отсутствовало и три датчика имели незначительное смещение в область отрицательных значений выходного напряжения.

Провалы характеристик в области высоких концентраций метана, характерные для серийных датчиков, отсутствуют, гистерезис показаний при изменении концентрации метана от 0 до 100 об.% и наоборот при работе измерительного моста в режиме стабилизации напряжения на рабочем элементе незначительный. При питании моста стабильным током заметный гистерезис показаний наблюдается в области концентраций метана от 60 до 100 об.%. Причины его очевидно аналогичны причинам появления гистерезиса у однокамерных датчиков метана при этом режиме питания.

Для примера на рис. 7.6 приведена полученная зависимость $U_{\text{вых}}=f(C)$ для термогруппы №4 при работе измерительного моста в режиме стабилизации напряжения на рабочем элементе. В отличие от известных зависимостей для од-

нокамерных датчиков [29], в области высоких концентраций зависимости для двухкамерных датчиков имеют более линейный характер, без перегибов и провалов. Это объясняется тем, что в области высоких концентраций, когда лимитирующим агентом становится горючее, за счет существенного ограничения поступления смеси к сравнительному элементу возможное окисление метана на нем в двухкамерном датчике не приводит к существенному тепловыделению и не снижает стабильность работы датчика.

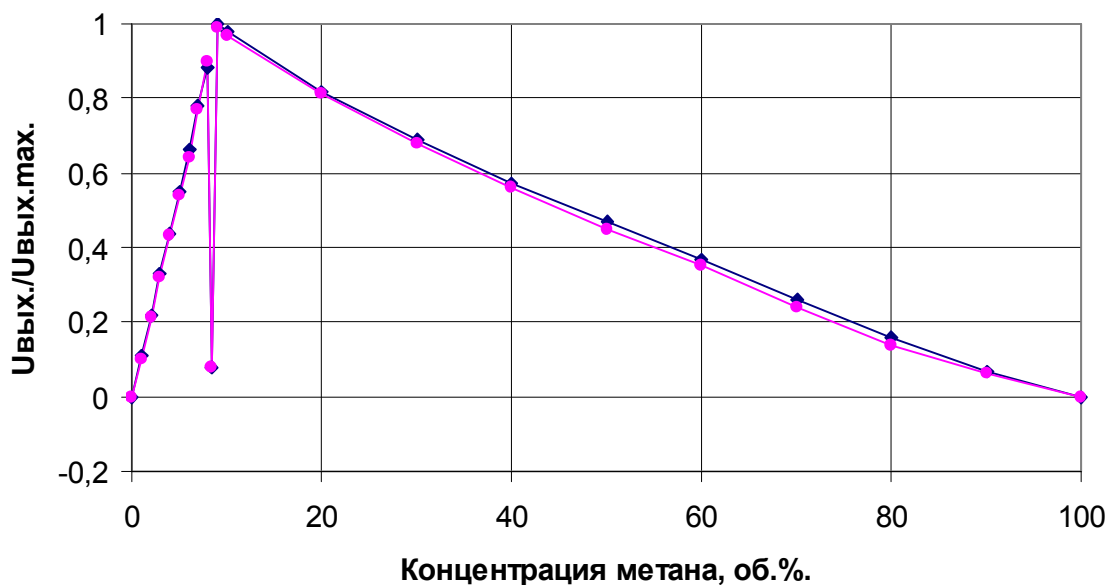


Рис. 7.6. Зависимость $U_{\text{вых.}}=f(C)$ для двухкамерного датчика (термогруппа №4) при стабилизации напряжения на рабочем элементе и изменении концентрации метана: \blacklozenge – от 0 до 100 об.%; \bullet – от 100 до 0 об.%

Оценка температурной стабильности измерительного моста при применении двухкамерных датчиков осуществлялась аналогично испытаниям моста с однокамерным датчиком. При испытаниях всех датчиков ноль моста устанавливался при температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, а диапазон изменения температуры среды составлял $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты исследования показали, что температурная стабильность двухкамерных датчиков аналогична стабильности серийных однокамерных термокаталитических датчиков. При всех рекомендованных режимах питания измерительного моста смещение нуля при изменении температуры в диапазоне $25 \pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышает $0,7\text{ мВ}$ (без дополнительной термической балансировки). Зона температурных смещений нуля мостовой измерительной схемы, полученная нами при исследовании всех двухкамерных датчиков, приведена на рис. 7.7. По этому показателю испытанные датчики не уступают однокамерным серийным датчикам. Все испытанные двухкамерные датчики могут быть термически сбалансированы по методике, приведенной в [68], что позволяет на порядок уменьшить температурный дрейф нуля.

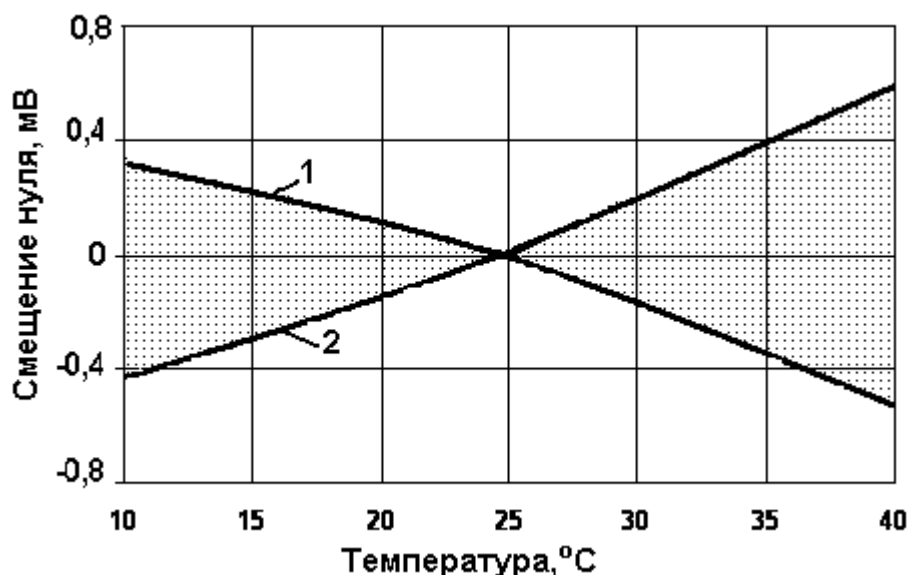


Рис. 7.7. Зона температурных смещений нуля мостовой измерительной схемы с двухкамерными датчиками

При проведении исследований работоспособности предложенных двухкамерных датчиков в многокомпонентных газовых смесях были использованы три бинарные аттестованные газоздушные смеси с содержанием горючих компонентов: CH_4 – 1,63 об.%, H_2 - 1,03 об.%, CO - 0,437 об.%, а также метано-водородо-воздушная смесь с содержанием компонентов: CH_4 - 1,85 об.% и H_2 - 1,5 об.%. Данные испытаний осредненные по пяти датчикам в режиме питания измерительного моста стабильным током в сопоставлении с результатами испытаний серийных однокамерных датчиков приведены в табл. 7.4.

Исследование двухкамерного датчика метана показали, что выходной сигнал по водороду в 1,15 раз больше чем сигнал при той же концентрации метана, а по оксиду углерода составляет 0,37 от сигнала по метану. При анализе метано-водородо-воздушной смеси выходной сигнал был равен сумме сигналов от обоих горючих компонентов.

Таблица 7.4

Выходное напряжение измерительного моста при питании стабильным током

Вид горючего газа и его концентрация в смеси с воздухом	Выходное напряжение измерительного моста с различными видами датчиков, мВ	
	серийный датчик	двухкамерный датчик
CH_4 – 1,63 об.%	21,8	21,3
H_2 - 1,03 об.%	7,9	15,5
CO - 0,437 об.%	0,1	2,1
CH_4 - 1,85 об.% и H_2 - 1,5 об.%	22,7	46,7

При экспериментальных исследованиях термокatalитических датчиков дополнительно установлено, что время установления показаний двухкамерных термокatalитических датчиков при скачкообразном увеличении концентрации

горючих газов, примерно на пять секунд меньше, чем серийных, что, по видимому, может быть объяснено существенно меньшим объемом камеры с чувствительным элементом по сравнению с серийными датчиками.

Таким образом, при применении предложенного двухкамерного термokatалитического датчика, обеспечивается выходная характеристика измерительного моста идентичная характеристике моста с серийными однокамерными датчиками метана и высокая температурная стабильность моста. Выходной сигнал датчика, в отличие от серийных однокамерных датчиков, равен сумме сигналов от всех горючих компонентов газовой смеси. Двухкамерный датчик может устанавливаться в серийную аппаратуру газового анализа взамен применяемых однокамерных датчиков без внесения каких либо изменений в ее конструкцию. При этом применение двухкамерных датчиков позволяет существенно повысить надежность контроля взрывоопасности газовой смеси и предотвратить возникновение аварий, причиной которых является несрабатывание аппаратуры газовой защиты.

7.3. Техническая реализация разработанных средств контроля

Результаты исследований термokatалитических датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов были использованы при опытно-конструкторской разработке переносных анализаторов метана, кислорода, токсичных газов (CO, H₂S, NH₃, NO₂) и температуры «Сигнал 9» (Приложение А).

Анализаторы предназначены для автоматического непрерывного контроля и измерения содержания метана, температуры, а также кислорода или одного из токсичных газов, и обеспечивают:

индикацию текущего значения содержания метана по вызову или при достижении установленных предельных значений температуры, кислорода или токсичных газов;

звуковую и световую сигнализацию при достижении установленных предельных значений контролируемого параметра;

Анализаторы предназначены для работы в угольных шахтах, на горнорудных предприятиях, в том числе опасных по газу и пыли, в условиях умеренного и холодного климата. В отличие от существующих анализаторов они обеспечивают повышение безопасности ведения горных работ за счет однозначности срабатывания сигнализации в диапазоне содержания метана от 0 до 99,9 об.% и одновременного непрерывного автоматического контроля метана, кислорода, токсичных газов и температуры с целью контроля по безопасным условиям работы.

Блок-схема анализатора метана переносного «Сигнал 9» приведена на рис. 7.8. Анализаторы состоят из: микропроцессорного блока преобразования и обработки информации; термokatалитического датчика метана; датчика температуры; электрохимического датчика (на кислород или вредный газ); элементов управления, цифрового индикатора; звукового индикатора; блока питания.



Рис. 7.8. Блок-схема анализатора метана переносного «Сигнал 9».

В качестве датчика метана в анализаторе использован изготавливаемый ВАТ «Красный металлист» серийный симметричный термокаталитический датчик. Различие тепловых режимов чувствительных элементов при этом обеспечивается путем шунтирования сравнительного элемента постоянным резистором. После включения датчика в мостовую измерительную схему снимается температурная зависимость нуля мостовой измерительной схемы в диапазоне рабочих температур (рис. 3.5), параметры которой заносятся в ПЗУ микропроцессорного блока. Корректировка нулевых показаний осуществляется при этом автоматически с учетом температурной зависимости и результатов измерения температуры среды. В качестве датчика температуры использован датчик температуры в интегральном исполнении DS18B20 фирмы Dallas Semiconductors с незначительным энергопотреблением и высокими метрологическими характеристиками.

Сведения по измеряемым компонентам шахтной атмосферы диапазонам их измерений по модификации анализатора «Сигнал 9» приведены в табл. 7.5.

Анализатор изготавливается в модификациях в зависимости от комплектации сенсорами. Количество и состав модификаций устанавливаются заказчиком. Схематическое изображение передней панели анализатора метана «Сигнал 9» приведено на рис. 7.9, а внешний вид анализатора приведен на рис. 7.10.

На передней панели анализаторов размещаются элементы управления и цифровое табло, на котором отображается химическая формула, и единицы измерения контролируемых газовых компонентов.

Конструкция анализатора обеспечивает возможность корректирования нуля, чувствительности в полуавтоматическом режиме без раскрытия корпуса.

Поверка и настройка анализаторов осуществляется с помощью синтезатора газовых смесей или поверочных газовых смесей.

Чувствительные элементы датчиков анализаторов имеют защиту, исключить прямой доступ жидкости и пыли к датчикам.

Основные технические характеристики анализатора «Сигнал 9» приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.5

Сведения о модификациях анализатора «Сигнал 9»

Модификации анализаторов	Контролируемые параметры	Диапазоны измерения
Сигнал 9.0	метан температура	0 %-2,5 % минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.1	метан температура	0 %-2,5 %; 2,5 %-99,9 % минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.2	метан оксид углерода температура	0 % – 2,5 % 0 -100ppm минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.3	метан оксид углерода температура	0 % – 2,5 %; 2,5 %-99,9 % 0 -100ppm минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.4	метан оксид азота температура	0 %-2,5 % 0 – 10ppm минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.5	метан сероводород температура	0 %-2,5 % 0 -40ppm минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.6	метан аммиак температура	0 %-2,5 % 0-100ppm минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.7	метан кислород температура	0 %-2,5 % 0 %-25 % минус 10 °С – 50 °С
Сигнал 9.8	метан кислород температура	0 %-2,5 %; 2,5 %-99,9 % 0 %-25 % минус 10 °С – 50 °С

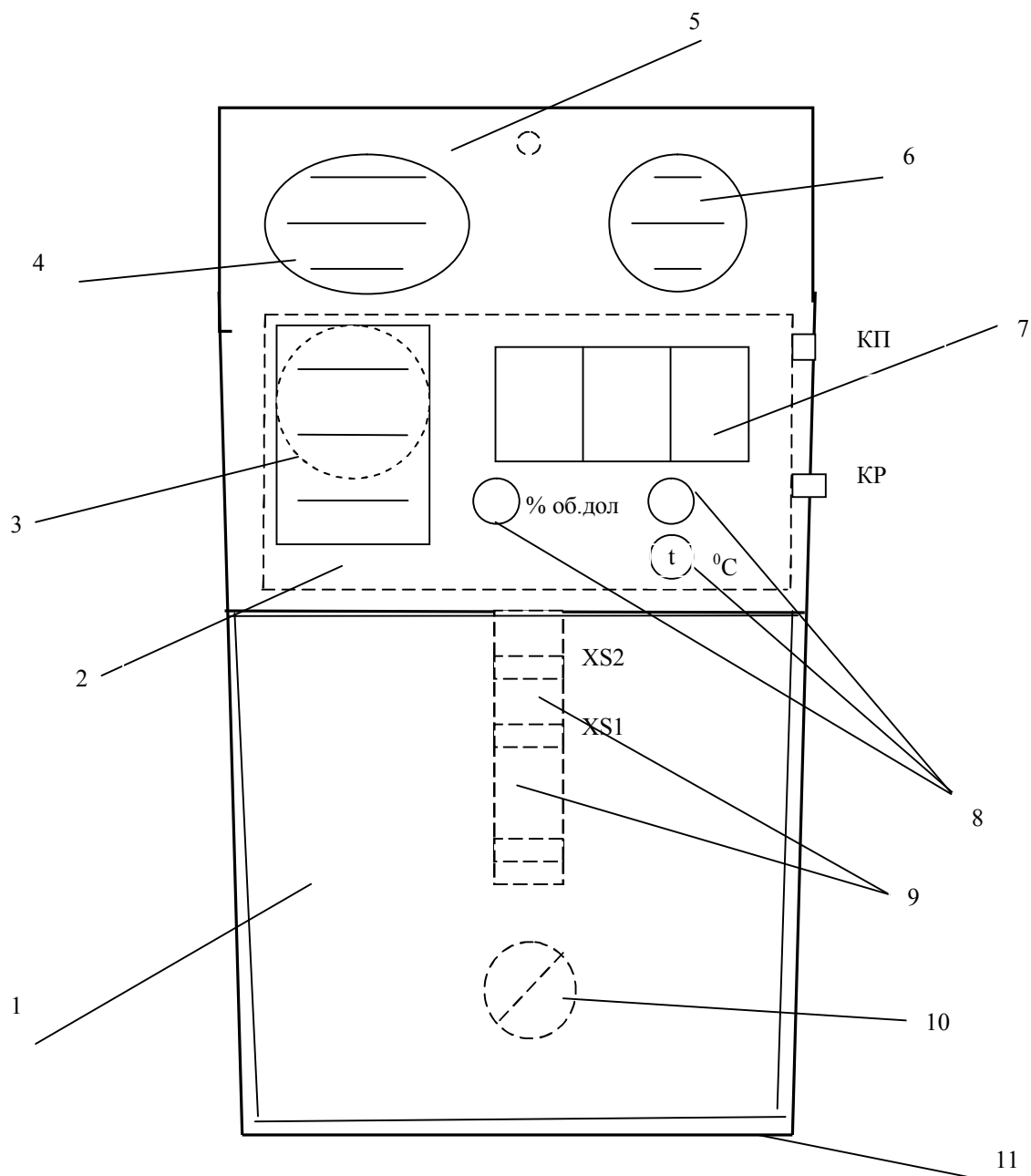


Рис. 7.9. Схема передней панели анализатора метана «Сигнал 9»:
 1-съемный аккумуляторный блок питания; 2-блок измерения и индикации; 3-электрохимический датчик; 4-датчик метана; 5- крышка отсека блока измерения и индикации; 6- звуковой излучатель; 7- цифровой индикатор; 8- световой индикатор индицируемого параметра; 9- контакты для подключения блока питания; 10- специальный винт крепления блока питания; 11- корпус анализатора

Аккумуляторный источник питания имеет защиту от глубокого разряда. Кроме того, по вызову оператора анализатор обеспечивает; индикацию напряжения питания аккумуляторной батареи, регистрацию и индикацию не меньше 5 значений содержания метана, которые превышают заданные предельные значения во времени, начиная с момента выдачи анализатора, а также индикацию

нормального и аварийного режимов работы. Подстройка нулевых показаний, чувствительности и пороговых значений срабатывания сигнализации осуществляется в полуавтоматическом режиме работы.



Рис. 7.10. Внешний вид анализатора метана переносного «Сигнал 9»

Таблица 7.6

Технические характеристики анализатора «Сигнал 9»

Наименование характеристики	Контролируемые параметры							
	CH ₄ , об.%	CH ₄ , об.%	NO	H ₂ S	NH ₃	O ₂ , об.%	CO	T °C
1. Диапазон измерения.	0 %-2,5%	0%-99,9%	0-10 ppm	0-40 ppm	0-100 ppm	0%-25%	0-100 ppm	минус 10 °C – 50 °C
2. Диапазон показаний.	0 %-99,9%	0%-99,9%	0-30 ppm	0 -70 ppm	0-250 ppm	0%-30%	0-250 ppm	минус 10 °C – 70 °C
3. Предел допускаемой основной приведенной погрешности	-	10	10	10	10	-	10	-
4. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности,	±0,2	-	-	-	-	±1,0	-	±2
5. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности, срабатывания сигнализации по показаниям анализаторов	±0,2	±0,2	±1,5	±4,0	±10	±1,0	±10	-
6. Цена наименьшего разряда цифровой индикации	0,01	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Анализаторы обеспечивают однозначность получаемой информации о содержании метана в соответствии с ГОСТ 24032.

Граница основной приведенной погрешности измерения содержания токсичных газов и объемного содержания метана в диапазоне от 2,5 % до 99,9 % составляет не более 10 %, а для канала измерения содержания метана в диапазоне от 0 % до 2,5 об.% абсолютная погрешность измерения составляет не более $\pm 0,2$ об.%

Срок непрерывной работы анализатора составляет не менее 10 ч. Время прогрева – не более 10 минут. Время установления показаний (при скачкообразном изменении содержания метана от 0 до 1,6 значение уставки срабатывания сигнализации) составляет не более 20 с.

Средняя наработка на отказ анализаторов составляет не менее 5000 ч, а средний срок службы – не менее 3 лет.

Измерение объемной доли метана в диапазоне от 0 до 5% осуществляется термokatалитическим датчиком метана с различными тепловыми режимами термоэлементов. В соответствии с программой работы анализатора устанавливается температура рабочего элемента датчика $400 \pm 10^{\circ}\text{C}$, а температура сравнительного элемента $300 \pm 10^{\circ}\text{C}$. Измерение объемной доли метана в диапазоне от 5 до 100% осуществляется в термокондуктометрическом режиме работы датчика метана, исходя из величины сопротивления сравнительного элемента термokatалитического датчика. Температура рабочего элемента термokatалитического датчика с целью защиты его от перегрева устанавливается при этом $200 \pm 10^{\circ}\text{C}$ (путем шунтирования черного термоэлемента транзисторным ключом). Питание термokatалитического датчика осуществляется от источника стабильного тока.

Токсичные газы и кислород контролируются электрохимическими ячейками различной конструкции. Сигнал с датчика температуры наряду с выводом на индикатор используются для корректировки показаний содержания метана и других газов.

Работой анализатора управляет микропроцессор. Программа процессора предусматривает:

- анализ исправности анализатора;
- обработку данных, полученных по каналам измерения от датчиков, управление режимами работы датчиков;
- отображение показаний на индикаторе;
- анализ текущих значений параметров, не отображаемых в данный момент на индикаторе;
- переключение индикации измеряемых параметров;
- задание частоты и длительности импульсов сигнализации, управление сигнальными устройствами – светодиодами и звуковым излучателем;
- запоминание установленных пороговых значений сигналов, нулевых значений сигналов, текущего превышения заданного порога объемной доли метана, кислорода или одного из токсичных газов в зависимости от модификации анализатора, времени работы анализатора до автоматического отключения блока питания;

измерение напряжения блока питания и его отключение при разряде;
анализ состояния кнопок управления,

Работой анализаторов управляют при помощи двух кнопок – рабочей КР и поверочной КП.

Кнопка КР служит для включения анализатора. При кратковременном нажатии кнопки КР на анализаторе по циклу производится индикация объемной доли метана, второго контролируемого газа, и температуры, в течение 40 с., затем анализатор автоматически переходит на индикацию содержания метана. При удерживании кнопки более 1÷2 с. анализатор переходит на индикацию напряжения блока питания. Кнопка КП используется при настройке и градуировке анализаторов, а также просмотре записей в «черном ящике». В рабочем режиме кнопка КП пломбируется.

Анализаторы имеют следующие режимы работы: режим градуировки и рабочий режим. В рабочем режиме производится измерение концентрации метана, кислорода или токсичных газов и температуры в зависимости от модификации анализатора, запись в память необходимых данных. В режиме градуировки производится корректировка нулевых показаний, градуировка, просмотр записей в памяти, запись пороговых значений срабатывания сигнализации и вывод на индикатор предела индикации по каждому каналу измерения в зависимости от модификации. Рабочий режим включается кнопкой КР. Режим градуировки включается кнопкой КР при нажатой кнопке КП. Питание анализаторов осуществляется от искробезопасного блока питания, содержащего малогабаритные никель - металлгидридные аккумуляторы.

Опытные образцы разработанного анализатора успешно прошли приемочные испытания (Приложение Б), за результатами которых анализатор метана переносной «Сигнал. 9» был рекомендован к серийному производству. Серийное производство анализаторов начато в 2008 году.

7.4. Направления дальнейшего совершенствования средств контроля взрывоопасности газовых смесей

Дальнейшие исследования в области совершенствования средств контроля взрывоопасности газовых смесей метана в первую очередь следует сконцентрировать в следующих направлениях:

- создание унифицированных широкодиапазонных средств контроля метана, обеспечивающих измерение с требуемой точностью содержания метана в диапазоне от 0 до 100 об.%, которые можно использовать как в системах газовой защиты так и для контроля содержания метана в трубопроводах дегазационных систем и газоотсасывающих установок;

- улучшения динамических параметров средств контроля для повышения быстродействия газовой защиты;

- создание многофункциональных приборов, позволяющих осуществлять комплексный контроль условий труда и параметров среды в подземных горных выработках шахт.

Вопрос создания унифицированных широкодиапазонных средств контроля, обеспечивающих с требуемой точностью измерение концентрации метана в диапазоне от 0 до 100 об.%, которые можно использовать как в системах газовой защиты, так и для контроля содержания метана в трубопроводах дегазационных систем и газоотсасывающих установок, до сих пор не нашел своего окончательного решения. Термокаталитические датчики обеспечивают высокую чувствительность анализаторов и требуемую точность измерения концентрации метана при измерении содержания метана в диапазоне его до взрывных концентраций.

В области взрывных и высоких концентраций метана они не обеспечивают требуемую точность измерения. Поэтому для контроля высоких концентраций метана, например в дегазационных трубопроводах, в основном используют термокондуктометрический способ, основанный на отличии теплопроводности метана и воздуха. В то же время анализаторы с термокондуктометрическими датчиками имеют малую чувствительность и не обеспечивают требуемую точность измерения в диапазоне до взрывных концентраций метана.

Одновременное использование двух названных датчиков для создания унифицированных широкодиапазонных средств контроля метана приводит к увеличению энергопотребления и усложняет анализаторы [51]. Известные широкодиапазонные анализаторы, в которых термокондуктометрический и термокаталитический частично совмещены. Они имеют две мостовые схемы для измерения соответственно низких и высоких концентраций метана [50]. Первая схема включает каталитически активный и компенсационный элементы, которые контактируют с контролируемым газом. Компенсационный элемент первого моста является частью второй мостовой схемы, в которой он выполняет функции чувствительного элемента. Вторая мостовая схема содержит также элемент, защищенный от контролируемого газа, который в этом мосте является компенсационным. Анализатор содержит также средства для коммутации напряжения питания обеих мостовых схем в зависимости от концентрации контролируемого газа.

В указанном анализаторе при повышении содержания метана выше указанного уровня первый мост, который содержит каталитически активный элемент, отключается и включается второй мост, который работает на кондуктометрическом принципе. При этом компенсационный элемент второй мостовой схемы, отключенный и холодный в начальном состоянии, начинает разогреваться, и измерение вторым мостом возможно только после окончания переходного процесса, связанного с разогревом компенсационного элемента. В это время измерения содержания метана не происходит, что снижает надежность газовой защиты. Кроме того, в таком анализаторе чувствительный элемент второй мостовой схемы имеет высокую температуру предварительного разогрева, что приводит к карбонизации его поверхности, а при аварийных загазировании горных выработок шахт к окислению высших гомологов метана, водорода и оксида углерода и нарушению его работоспособности.

Предложенные нами термокаталитические датчики с различными тепловыми режимами чувствительных элементов имеют существенные преимущест-

ва перед известными датчиками, что позволяет на их основе создавать унифицированные широкодиапазонные анализаторы метана. Для создания таких анализаторов может быть использован термokatалитический датчик, отличающийся применением термоэлементов с одинаковым начальным сопротивлением и разной площадью поверхности, при условии его питания от источника стабильного тока. Выбор температуры предварительного нагрева сравнительного элемента ниже 300 °С фактически исключается его карбонизацию и исключает возможность окисления на нем горючих компонентов, характеризующихся низкой температурой воспламенения, появляющихся при аварийных загазованиях горных выработок шахт.

При указанной температуре сравнительного элемента термokatалитического датчика он может непосредственно, без изменения режима питания и, следовательно, его температурного режима, использоваться для контроля высоких концентраций метана (в качестве чувствительного элемента термokonдуктометрического датчика).

В случае питания измерительного моста от источника стабильного тока, с целью защиты от перегрева чувствительного элемента при взрывных концентрациях метана, он может шунтироваться при достижении заданной пороговой концентрации метана, например 5 об.%. Режим работы сравнительного элемента в этом случае не меняется и по величине напряжения на этом элементе осуществляется контроль взрывных и высоких концентраций метана.

Для исключения длительных переходных процессов, связанных с изменением температурного режима датчика вследствие шунтирования каталитически активного элемента, сравнительный элемент должен быть установлен отдельно от чувствительного, а для исключения погрешности измерения от изменения температуры окружающей среды, анализатор должен дополнительно комплектоваться датчиком температуры и обеспечивать автоматическое введение температурной поправки.

Вопрос повышения быстродействия автоматической газовой защиты является весьма актуальным для шахт опасных по внезапным выбросам, а также для горных выработок, в которых вследствие наличия мощных источников газовой выделенной возможно быстрое загазирование атмосферы (при вскрытии суфляров, прорыве метана из почвы выработки и др.). Существенным является этот вопрос и при разработке средств газовой защиты для забойных машин и шахтных электровозов.

Выполненные нами экспериментальные исследования предложенных термokatалитических датчиков показали, что время установления показаний двухкамерных термokatалитических датчиков при скачкообразном увеличении концентрации горючих газов, меньше, чем у серийных датчиков метана. Это позволяет, наряду с решением поставленных задач, несколько повысить и быстродействие средств газовой защиты.

Другим вариантом решений, направленных на увеличение быстродействия средств газовой защиты, может быть использование упреждающего отключения оборудования исходя из показателей, которые одновременно характеризуют концентрацию метана, и скорость ее нарастания времени.

Возможным решением вопроса повышения быстродействия следует также считать одновременное использование в анализаторах метана двух типов датчиков, один из которых является термokatалитическим, а другой – основан на способах измерения, обеспечивающих высокое быстродействие защиты (оптический, ультразвуковой и др.). В таком случае термokatалитический датчик обеспечивает высокую точность измерения и за его показаниями, с относительно большой постоянной времени, осуществляется корректировка текущего значения выходного сигнала канала измерения с малоинерционным датчиком. Последний может быть в таком случае менее точным, на его выходной сигнал могут влиять медленно изменяющиеся факторы среды измерения (температура, загрязнение канала измерения и др.).

Вопрос создание многофункциональных приборов, позволяющих осуществлять комплексный контроль условий труда и параметров среды в подземных горных выработках шахт является весьма актуальным для повышения безопасности труда, снижения уровня аварийности и травматизма на угольных шахтах Украины. Производство таких изделий освоено некоторыми ведущими фирмами в США, Германии, Японии. Однако, учитывая значительную цену таких изделий, необходимость их периодического обслуживания и замены чувствительных элементов, влекущую за собой большие эксплуатационные затраты, эти изделия практически не нашли применения в Украине. Выполненные нами исследования в данной области позволяют освоить производство многофункциональных приборов в Украине.

Первым многофункциональным прибором, производство которого начато ОАО НВО «Красный металлист» является разработанный нами переносной анализатор метана, кислорода, токсичных газов (CO , H_2S , NH_3 , NO_2) и температуры «Сигнал 9». В дальнейшем необходимо сконцентрировать внимание на разработке многофункциональных стационарных средств для автоматического контроля состава и параметров рудничной атмосферы с перспективой их широкого использования в разрабатываемых системах автоматической противоаварийной защиты шахт (АСПАШ).

Выводы

Приведенные в главе результаты исследования разработанных средств контроля метана и анализ направлений дальнейшего совершенствования средств контроля взрывоопасности газовых смесей позволяют сделать следующие выводы.

1. Все предложенные однокамерные термokatалитические датчики с различными тепловыми режимами чувствительных элементов сохраняют работоспособность и обеспечивают контроль взрывоопасности газовых смесей при аварийных загазованиях горных выработок шахт. Выходной сигнал этих датчиков определяется суммарной теплотворной способностью горючих компонент рудничной атмосферы. Результаты лабораторных исследований датчиков фактически совпадают с теоретическими расчетами и свидетельствуют о том, что при выбранных тепловых режимах сравнительного элемента горение водо-

рода и оксида углерода на нем не происходит, а выходной сигнал датчиков в этом случае определяется суммарной теплотворной способностью горючих компонентов с учетом их диффузионных свойств.

2. Для всех исследованных датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов характерно существенное смещение нуля измерительного моста в область отрицательных значений напряжения при 100 об.% метана, что объясняется более интенсивным охлаждением рабочего термоэлемента по сравнению со сравнительным в среде с большей теплопроводностью. Наличие такого смещения не позволяет без корректировки показаний анализаторов в области высоких концентраций метана обеспечить однозначность срабатывания защиты в области концентраций метана от 0 до 100 об.%.

3. В режиме стабилизации напряжения на рабочем элементе гистерезис показаний при изменении концентрации метана от 0 до 100 об.% и наоборот практически отсутствует. При питании измерительного моста от источника стабильного тока у некоторых датчиков наблюдается незначительный гистерезис показаний в диапазоне от 60 до 100 об.%.

4. При применении термокаталитических датчиков с шунтированием сравнительного элемента возникает существенная температурная нестабильность измерительного моста, которая не может быть устранена известными методами. Применение таких датчиков в анализаторах возможно только при наличии датчика температуры и осуществлении температурной коррекции выгодного сигнала моста за показаниями этого датчика.

5. При применении датчиков с термоэлементами одинакового начального сопротивления, отличающихся площадью поверхности, и с термоэлементами одинакового размера, отличающихся величиной начального сопротивления, требуемая температурная стабильность моста обеспечивается при всех рекомендованных режимах питания и вариантах включения датчиков. Кроме того такие датчики позволяют осуществлять дополнительную термическую балансировку измерительного моста известными методами, что позволяет на порядок уменьшить смещение нуля анализатора в диапазоне рабочих температур. В этом случае при нормировании погрешности анализатора составляющая, обусловленная температурной нестабильностью нуля измерительного моста, может не учитываться.

6. При применении предложенного двухкамерного термокаталитического датчика, обеспечивается выходная характеристика измерительного моста идентичная характеристике моста с серийными однокамерными датчиками метана и высокая температурная стабильность моста. Выходной сигнал датчика, в отличие от серийных однокамерных датчиков, равен сумме сигналов от всех горючих компонентов газовой смеси. Двухкамерный датчик может устанавливаться в серийную аппаратуру газового анализа взамен применяемых однокамерных датчиков без внесения каких либо изменений в ее конструкцию. При этом применение двухкамерных датчиков позволяет существенно повысить надежность контроля взрывоопасности газовой смеси и предотвратить возникновение аварий, причиной которых является несрабатывание аппаратуры газовой защиты.

7. Результаты исследований термokatалитических датчиков с различными тепловыми режимами чувствительных элементов были использованы при опытно-конструкторской разработке переносных анализаторов метана, кислорода, токсичных газов (CO, H₂S, NH₃, NO₂) и температуры «Сигнал. 9» (Приложение А).

Опытные образцы разработанного анализатора успешно прошли приемочные испытания (Приложение Б), за результатами которых анализатор метана переносной «Сигнал. 9» был рекомендован к серийному производству.

8. Дальнейшие исследования в области совершенствования средств контроля взрывоопасности газовых смесей метана следует осуществлять в направлении дальнейшего совершенствования конструкции и параметров термokatалитических датчиков горючих газов, создания унифицированных широкодиапазонных средств контроля, обеспечивающих измерение с требуемой точностью концентрации метана в диапазоне от 0 до 100 об.%, которые можно использовать как в системах газовой защиты так и для контроля содержания метана в трубопроводах дегазационных систем и газоотсасывающих установок и улучшения динамических параметров средств контроля для повышения быстродействия газовой защиты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии приведено решение актуальной научной задачи повышения надежности контроля взрывоопасности газовых смесей при аварийных загазованиях, заключающееся в установлении закономерностей процесса окисления смеси горючих газов в термокаталитических датчиках метана и закономерностей изменения характеристик их чувствительных элементов при продолжительной эксплуатации в шахтных условиях, на основе которых разработаны способы и средства контроля взрывоопасности газовых смесей, основанные на использовании разных тепловых режимов чувствительных элементов и отдельного управления диффузионными потоками контролируемой среды к элементам датчика, обоснованы параметры разработанных термокаталитических датчиков метана, обеспечивающие работоспособность газоанализаторов при аварийных загазованиях горных выработок шахт.

Наиболее важные научные и прикладные результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Установлено, что основной причиной, обуславливающей отказы существующих средств газовой защиты при аварийных загазованиях горных выработок шахт, является несрабатывание автоматической газовой защиты или сигнализации о наличии недопустимой концентрации метана из-за неоднозначности работы средств контроля взрывобезопасности при высоких концентрациях метана и сбоях в работе термокаталитических датчиков при высоких концентрациях метана, возникающие вследствие окисления горючих газов на сравнительном элементе датчика.

2. Путем исследования особенностей работы термокаталитических датчиков при высоких концентрациях метана и влияния неконтролируемых компонентов и параметров рудничной атмосферы на их работу выявлены и объяснены причины неоднозначной и нестабильной работы существующих средств контроля содержания метана.

3. Выявлено, что активация сравнительного элемента существующих термокаталитических датчиков анализаторов метана обуславливается накоплением на поверхности сравнительного элемента продуктов термической деструкции углеводородов, а также дополнительным разогревом сравнительного элемента в результате окисления на нем высших гомологов метана, водорода и оксида углерода, присутствующих в рудничном газе.

4. Установлены закономерности процесса накопления продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности чувствительных элементов термокаталитических датчиков при нормальной работе анализаторов метана и при аварийных загазованиях горных выработок. Показано, что для предотвращения карбонизации чувствительных элементов следует выбирать температуру предварительного нагрева рабочего элемента более 410 °С, а температуру предварительного нагрева сравнительного элемента снижать до 300 °С.

5. Показано, что в аварийных условиях (при взрывах, пожарах, внезапных выбросах угля, породы и газа), когда помимо метана в атмосфере горных выработок могут в значительных количествах присутствовать водород, оксид угле-

рода и высшие гомологи метана, существующие термokatалитические датчики не обеспечивают требуемой точности контроля взрывоопасности газовой смеси.

6. Теоретически и экспериментально обоснованы пути улучшения эксплуатационных и метрологических характеристик средств контроля содержания метана, в том числе: повышения стабильности нулевых показаний средств контроля содержания метана, увеличения временной стабильности термokatалитических датчиков, снижения влияния загрязнения газодиффузионного фильтра и изменения каталитической активности элементов.

7. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика балансировки измерительного моста с термokatалитическим датчиком, позволяющая уменьшить уход нуля мостовой измерительной схемы при применении серийно изготовленных термогрупп и предложена методика подбора термоэлементов при массовом производстве, обеспечивающая повышение качества термогрупп.

8. Предложены, теоретически и экспериментально обоснованы способы измерения концентрации метана, обеспечивающие работоспособность анализаторов метана при аварийных загазованиях горных выработок шахт, в том числе:

- способ, заключающийся в использовании различных тепловых режимов чувствительных элементов в термokatалитических датчиках;

- способ, заключающийся в раздельном управлении диффузионными потоками контролируемой среды к чувствительным элементам, что возможно при применении двухкамерных датчиков с диффузионной проводимостью фильтра камеры, в которой установлен сравнительный элемент, значительно меньшей диффузионной проводимости фильтра камеры с рабочим элементом.

7. Теоретически обоснованы параметры и режимы работы анализаторов метана, обеспечивающие температурную стабильность измерительного моста при различных вариантах выполнения термokatалитических датчиков с различными тепловыми режимами элементов. Обоснована конструкция, параметры и режимы работы термоэлементов в двухкамерных термokatалитических датчиках.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования были использованы при опытно-конструкторской разработке переносных анализаторов метана, кислорода, токсичных газов (CO, H₂S, NH₃, NO₂) и температуры «Сигнал 9».

Опытные образцы разработанного анализатора успешно прошли приемочные испытания, за результатами которых анализатор метана переносной «Сигнал 9» был рекомендован к серийному производству, которое начато в 2008 году на ОАО НПО «Красный металлист».

ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голинько В.И. Аварийно-спасательные работы в шахтах / Голинько В.И., Алексеенко С.А., Смоланов И.Н. – Днепропетровск: Лира ЛТД. – 2011. – 480 с.
2. Брюханов А.М. Научно-технические основы расследования и предотвращения аварий на угольных шахтах / Брюханов А.М. – Донецк: Норд-пресс, 2004. – 347 с.
3. Рудничная вентиляция. Справочник / [Н.Ф.Гращенко, А.Э.Петросян, М.А.Фролов и др.] – М.: Недра, 1988. – 440 с.
4. Ткачук С.П. Взрыво-пожароопасность горного оборудования / Ткачук С.П., Колосюк В.П., Ихно С.А. – К.: Основа, 2000. – 695 с.
5. Взрывобезопасность рудничного электрооборудования / [под ред. А.А. Каймакова]. - М.: Недра, 1994. – 207 с.
6. Котляров А.К. Особенности формирования взрывоопасной среды в горных выработках шахт / Котляров А.К. // Зб. наук. пр. НГУ. – 2007. – №28. – С. 91-99.
7. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / [А.М. Брюханов, А.Г. Мнухин, В.П. Колосюк и др.] – Донецк: Норд-пресс, 2004. – Ч. I – 548 с.
8. Расследование и предотвращение аварий на угольных шахтах / [А.М. Брюханов, А.Г. Мнухин, В.П. Колосюк и др.] – Донецк: Норд-пресс, 2004. – Ч. II – 632 с.
9. Кучеба П.К. Организационно-экономический механизм управления охраной труда на шахтах / Кучеба П.К. – Донецк: ИЭП НАН Украины, ДонГАУ, 1997. – 288с.
10. Брюханов А.М. Анализ обстоятельств взрывов метана на угольных шахтах и разработка мероприятий по их предотвращению / Брюханов А.М., Мнухин А.Г., Бусыгин К.К. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр./ МакНИИ. – Макеевка, 2002. - С. 15-24.
11. Ликвидация аварий в угольных шахтах / [В.В.Радченко, С.Н.Смоланов, Г.М.Алейникова и др.] – Киев: Техника, 1999. – 320 с.
12. Брюханов А.М. Анализ взрывов метана и угольной пыли на угольных шахтах, вызвавших человеческие жертвы / Брюханов А.М., Колосюк В.П., Левкин Н.Б. //Тр. научн.-практ. семин. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка, 2002. – С. 18-31.
13. Bryukhanov A.M. Methane monitoring at a job site underground / A.M. Bryukhanov, V.N. Medvedev // 30th International Conference of Safety in Mines Research Institutes (Johannesburg, 5-9 October 2003). – 2003. – P. 649-657.
14. Брюханов А.М. Закономерности формирования взрывоопасной среды при внезапных выбросах породы, угля и газа в тупиковых выработках угольных шахт / Брюханов А.М. // Зб. наук. пр. „Пожежна безпека”. – Львів: ЛДУ БЖД, 2007. – №10. – С. 121-125.

15. Брюханов А.М. Условия формирования взрывоопасной среды после внезапного выброса угля и метана / Брюханов А.М. // Науковий вісник УкрНДІПБ України. – К., 2007. – № 1 (15). – С. 23-27.
16. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах. Том 1. – К.: Держнаглядодохоронпраці, 2003. – 480 с.
17. Брюханов А.М. Моделирование формирования взрывоопасной среды при газодинамических процессах в угольных шахтах / Брюханов А.М. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка, 2007. – № 19. – С. 64-72.
18. Брюханов А.М. Математическое моделирование закономерностей формирования взрывоопасной среды при внезапных выбросах угля и газа в очистных выработках / Брюханов А.М. // Геотехническая механика. Межвед. сб. науч. тр. – Д.: ИГТМ НАН Украины, 2007. – Вып. 69. – С. 121-128.
19. Касимов О.И. Оценка параметров переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт / О.И. Касимов, Р.Э. Капиев // Борьба с газом и пылью на угольных шахтах. – К.: Киев, 1965, вып.2. – С. 3 – 13.
20. Касимов О.И. О физической сущности переходных газодинамических процессов на выемочных участках шахт Донбасса / Касимов О.И., Попов И.Н., Бобров А.И. // Вопросы безопасности в угольных шахтах. – М.: Недра, 1968, т. XVIII. – С. 78-87.
21. Бобров А.И. Борьба с местными скоплениями метана в угольных шахтах / Бобров А.И. – М.: Недра, 1988. – 148 с.
22. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах / [Г.Д. Лидин, А.Т. Айруни, Ф.С. Клебанов и др.] – М.: Госгортехиздат, 1961. – 138 с.
23. Мясников А.А. Предупреждение взрывов газа в угольных шахтах / Мясников А.А., Старков С.П., Чикунов В.И. – М.: Недра, 1985. – 205 с.
24. Гороновский И.Т. Краткий справочник по химии / Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф. – Киев: Наукова думка, 1987. – 830 с.
25. Печук И.М. О содержании гомологов метана в атмосфере шахтных выработок / Печук И.М. // Борьба с газом и пылью в угольных шахтах. МакНИИ. – Макеевка, 1967. – №3. – С. 53-64.
26. Правила безпеки у вугільних шахтах. НПАОП 10.0-1.01-10. - К.: Охорона праці, 2010. – 430 с.
27. Егоров В.А., Кондратенко И.Д. Концентрация газов и количественные их отношения в рудничном воздухе при пожарах, взрывах и внезапных выбросах угля и газа / В.А. Егоров, И.Д. Кондратенко // Уголь Украины. – 1970. – № 1. – С. 46-48.
28. Павленко В.А. Газоанализаторы / Павленко В.А. - М.-Л.: Машиностроение, 1965. – 296 с.
29. Голинько В.И. Контроль взрывоопасности горных выработок шахт / Голинько В.И., Котляров А.К., Белоношко В.В. – Д.: Наука и образование, 2004. – 207 с.
30. Карпов Е.Ф. Автоматическая газовая защита и контроль рудничной атмосферы / Карпов Е.Ф., Биренберг И.Э., Басовский Б.И. – М.: Недра, 1984. – 285 с.

31. Природные опасности в шахтах. Способы их контроля и предотвращения / [Е.Ф.Карпов, Ф.С. Клебанов, А.Э. Петросян и др.] – М.: Недра, 1981. – 471 с.
32. Щербань А.Н. Методы и средства контроля рудничного газа / А.Н. Щербань, Н.И. Фурман. – К.: Наукова думка, 1965. – 411 с.
33. Маликов В.Т., Биренберг Э.И. Оптико-акустические малоинерционные метан-реле / В.Т. Маликов, Э.И. Биренберг // Автоматические газоанализаторы. – М.: ЦИНТИЭлектропром, 1961. – С. 248 – 254.
34. Айруни А.Т. Аппаратура техники безопасности за рубежом / Айруни А.Т. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1970. – 81 с.
35. Марголис З.И. Окисление углеводородов на гетерогенных катализаторах / Марголис З.И. – М.: Химия, 1977. – 363 с.
36. Медведев В.Н. Математическая модель формирования выходных сигналов термокаталитических датчиков метана / Медведев В.Н. // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр. МакНИИ. – Макеевка, 2006 – № 18. – С. 121-129.
37. Введение к теории сгорания и метод контактного сгорания. Материалы симпозиума фирмы “Рикен Кейки”. – Токио, 1983. – 67 с.
38. Карпов Е.Ф. Автоматизация и контроль дегазационных систем / Е.Ф. Карпов, А.В. Рязанов. – М.: Недра, 1983. – 162 с.
39. Система мониторинга параметров рудничной атмосферы SMP-NT. – Катовице: Центр электрификации и автоматизации горнодобывающей промышленности ”ЕМАГ”, 2001. – 8 с.
40. Карпов Е.Ф. Тепловой метод контроля концентрации метана в дегазационных трубопроводах / Е.Ф. Карпов, А.В. Рязанов.// Научные сообщения Института горного дела им. А.А. Скочинского. - 1974. - Вып. 121. - С. 138-143.
41. Рид Р. Свойства жидкостей и газов / Рид Р., Шервуд Т. – М.: Гостопиздат, 1964. – 334 с.
42. Бретшнайдер С. Свойства газов и жидкостей/ Бретшнайдер С. - М.-Л.: Химия, 1966. – 535 с.
43. Цедерберг Н.В. Теплопроводность газов и жидкостей/ Цедерберг Н.В. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
44. Котляров А.К. Теоретическая оценка погрешностей термокондуктометрических анализаторов метана от неизмеряемых компонентов рудничной атмосферы / А.К. Котляров, В.Е. Фрундин / Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип. 77. – С. 87-93.
45. Балтайтис В.Я. Тушение пожаров в угольных шахтах / Балтайтис В.Я. – М.: Госгортехиздат, 1961. – 283 с.
46. Дегазация при тушении пожаров в угольных шахтах / [А.Л. Романчук, Г.М. Алейникова, Н.И. Привалов и др.] – Киев: Техника, 1985.– 119с.
47. Голинько В.И. Исследование процесса теплообмена в термокондуктометрических датчиках метана / В.И. Голинько, А.К. Котляров // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: Сб. научн. тр., Выпуск 18. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ, 2006. – С. 301-314.
48. Пат. 13933А Україна, МК G01N27/18. Термокондуктометричний дат-

чик / [В.О. Бойко, В.Ю. Фрундін, В.В. Білоножко та ін.] // Опубл. 25.04.97 Бюл. №2.

49. Голинько В.И. Теоретическое обоснование параметров термокондуктометрического датчика метана с неизолированным сравнительным элементом / В.И. Голинько, А.К. Котляров // Сб. науч. тр. НГУ. – 2006. – №26. – С. 60-67.

50. Пат. №2475733 Франция, МКИ G01 N 27/16. Детектор горючего газа // Опубл. 08.01.1982. "Изобретения в СССР и за рубежом" № 1, 1982.

51. Пат. 61611А Україна, МК G01N25/22, E21F17/18. Система контролю вмісту горючого газу в шахтній атмосфері / В.В. Білоножко, В.П. Білоножко, В.І. Голінько, А.К. Котляров та ін. // Опубл. 17.11.03 Бюл. №11.

52. Пат. 79969 Україна, МПК МПК E21F 17/18, G01N 25/22. Аналізатор горючих газів / [О.К. Котляров, В.І. Голінько, О.В. Білоножко, В.В. Білоножко] // Опубл. 10.08.07. Бюл. №12.

53. Збірник інструкцій до правил безпеки у вугільних шахтах. Том 2. – К.: Держнаглядохоронпраці, 2003. – 416 с.

54. Приборы шахтные газоаналитические. Общие технические требования, методы испытания: ГОСТ-24032-80. – М.: Госстандарт, 1980. – 34 с.

55. Миняйло П.М. Комплекс телеавтоматического контроля метана высоких концентраций ТКМВ / Миняйло П.М., Наружный В.М., Азбель М.Д. // Безопасность труда в промышленности, 1986. - №1. – 36 с.

56. Азбель М.Д. Анализ результатов испытаний комплекса контроля метана высоких концентраций ТКМВ / М.Д. Азбель, А.Л. Замула // Системы автоматизации и связи в угольной промышленности. – М: 1986. – С. 46-51.

57. Комплект аппаратуры АМТ-3И. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Конотоп: НПО «Красный металлист», 1982. – 44 с.

58. Environmental Monitoring System // Collieru Guardian, 1984, 232, №1. – S. 11-12.

59. Bordin D. Ventilation monitor system for environmental clean, safe workplace / Bordin D. //Can; Mining. J., 1983, 104, N8. – S. 23-24.

60. Waddle R.J. A unique data transmission system for environmental monitoring / Waddle R.J. // Curnent, 1985, June. – S. 87-90

61. Комплекс «Метан». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Конотоп: НПО «Красный металлист», 1988. – 53 с.

62. Rai B.S. Microprocessor-Based system for the monitoring of underground mine environments / Rai B.S., Tripathi C.B., Singh B.P. – Stud. J. Inst. Electron. And Tel. End., 1986, 27, №3. – S. 102 – 105.

63. Hanko J. Up-to date instruments and system for the monitoring of mine ventilation / Hanko J. // Publ. Hund. Gent. Inst. Develop. Mining, 1985 - 1986, № 28—29.

64. Биренберг И.Э. Стационарная система автоматического непрерывного контроля метана с диагностикой термокаталитического датчика / Биренберг И.Э., Ланда Е.Ш., Тросман Г.С. // Системы автоматизации и связи в угольной промышленности. - М: 1986. – С. 38 – 46.

65. Gabriel L. Le controle general de l'atmosphere / Gabriel L., Tauziede C. // Ind. miner. Mines et canniere, 1987, 69, №3, 84-88.

66. Комплекс контроля рудничной атмосферы КРАУ унифицированный / [В.П. Белоножко, А.А. Марченко, С.Л. Белякова и др.] // Уголь Украины, №6, 1992. – С. 25-28.
67. Аппаратно-программный комплекс КАГИ. – Макеевка: МакНИИ, 2000. – 4 с.
68. Голинько В.И. Совершенствование термokatалитических средств контроля содержания метана / В.И. Голинько, В.В. Белоножко // Гірнична електро-механіка та автоматика: Наук. техн. зб. – 2003. – Вип.70. – С. 92-100.
69. Голинько В.И. Исследование работоспособности термokatалитических датчиков метана после их длительной эксплуатации / В.И. Голинько, А.В. Белоножко // Науковий вісник НГУ. – 2006. – №10. – С. 72-75.
70. Белоножко В.В. Исследование временной стабильности термokatалитических датчиков метана / Белоножко В.В. // Науковий вісник НГУ. - Дніпропетровськ, 2003. - №11. - С. 76-79.
71. Пат. 76648 Україна, МПК E21F 17/18, G01F 15/00. Спосіб підвищення механічної стійкості термokatалітичного датчика горючих газів / О.К. Котляров, В.І. Голинько О.В. Білоножко, В.В. Білоножко (Україна) - № а 2005 00131; заявл. 05.01.05; опубл. 15.08.06. Бюл. №8.
72. Голинько В.И. Исследование процесса окисления метана в термokatалитических датчиках / В.И. Голинько, А.В. Белоножко // Науковий вісник НГУ, - Дніпропетровськ, 2003 - №7, с. 62-65.
73. Голинько В.И. Исследование процессов накопления продуктов термической деструкции углеводородов на поверхности термоэлементов / В.И. Голинько, А.В. Белоножко // Науковий вісник НГУ. – 2008. – №7. – С. 60-65.
74. Комплект аппаратуры АТ-1.1, АТ-3.1. Технические условия ТУ АТ-1.1, АТ-3.1. – Конотоп: НПО «Красный металлист», 1998. – 65 с.
75. Метан-реле комбайновое ТМРК-3.1М. Технические условия ТУ ТМРК-3.1М. – Конотоп: НПО «Красный металлист», 1999. – 46 с.
76. Теоретические и экспериментальные исследования термokatалитического датчика метана / [Фрундин В.Е., Лимаренко П.Л, Николаенко В.В. и др.] // Автоматизация контроля параметров рудничной атмосферы и управление проветривания шахт. – К.: Наукова думка, 1974. Вып. 1. – С. 99-117.
77. Голинько В.И. Теоретическое обоснование параметров термокондуктометрического датчика метана с неизолированным сравнительным элементом / В.И. Голинько, А.К. Котляров // Сб. науч. тр. НГУ. – 2006. – №26. – С. 60-67.
78. Голинько В.И. Разработка и исследование однокамерного термокондуктометрического датчика метана В.И. Голинько, А.К. Котляров // Науковий вісник НГУ. – 2007. - №.6 - С. .85-89.
79. Голинько В.И. Обоснование мостовой измерительной схемы термokatалитических газоанализаторов / Голинько В.И., Романенко В.И., Фрундин В.Ю. // Сб. науч. тр. НГУ. – 2003. – №17, том 2. – С. 352-357.
80. Котляров А.К. Обоснование режимов работы мостовых измерительных схем термокондуктометрических анализаторов метана / Котляров А.К. // Науковий вісник НГУ. – 2006. - №11. - С. 62-65.
81. Голинько В.И. Выбор режима питания термокондуктометрических дат-

чиков в анализаторах метана / В.И. Голинько, А.К. Котляров // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. Серія “Гірництво”: Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ “КПІ”, 2007. - Вип. 15. - С. 101-106.

82. Голинько В.И., Белоножко А.В. Совершенствование термодаталитического метода контроля содержания метана в рудничной атмосфере // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2006. – Вип.77. – С. 81-87.

83. Голинько В.И. Повышение надежности контроля взрывоопасности многокомпонентных газовых смесей термодаталитическими датчиками / В.И. Голинько, А.В. Белоножко // Разработка рудных месторождений: Научн.-техн. сб. – 2007. Вып. 91. – С. 242-245.

84. Голинько В.И. Совершенствование стационарных средств контроля взрывоопасности газовых смесей / В.И. Голинько, А.К. Котляров, А.В. Белоножко // Разработка рудных месторождений: Научн.-техн. сб. – 2008. Вып. 92. – С. 222-225.

85. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф – М.: Наука, 1977. – 942 с.

86. Онищенко А.М. Оптимизация приборов для контроля состава вещества / Онищенко А.М. – М: Машиностроение, 1990. – 301 с.

87. Пат. 61224А Україна, МК G01N25/22. Спосіб вимірювання вмісту горючих газів в шахтній атмосфері та пристрій для його реалізації / [В.В. Білоножко, В.П. Білоножко, В.І. Голінько та ін.] // Опубл. 17.11.03. Бюл. №11.

88. Зедишиидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многофакторных систем / Зедишиидзе И.Г. - М.: Наука, 1976. - 390 с.

89. Пат. 79969 Україна, МПК E21F 17/18, G01N 25/22. Аналізатор горючих газів / О.К. Котляров, В.І. Голінько, О.В. Білоножко, В.В. Білоножко (Україна) - № а 2005 00128 заявл. 05.01.05; опубл. 10.08.7. Бюл. №12.

90. Пат. 76648 Україна, МПК E21F 17/18, G01F 15/00. Спосіб підвищення механічної стійкості термодаталітичного датчика горючих газів / О.К. Котляров, В.І. Голінько О.В. Білоножко, В.В. Білоножко (Україна) - № а 2005 00131; заявл. 05.01.05; опубл. 15.08.06. Бюл. №8.

91. Патент України 62857 А, МК G01N27/18. Датчик шахтних газоаналізаторів і спосіб його виготовлення / В.В. Білоножко, В.П. Білоножко, В.І. Голінько та ін. // Опубл. 15.12.03 Бюл. №12.

92. Стационарная аппаратура контроля метана в горных выработках / Е.Ф. Карпов, Б.И. Басовский, Е.Ш. Ланда и др. - Безопасность труда в промышленности, 1991. - № 2. - С. 2-8.