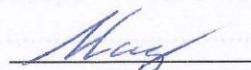


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра Механики многофазных систем

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ
В ГЭК И ПРОВЕРЕНО НА ОБЪЕМ
ЗАИМСТВОВАНИЯ

И.о. заведующего кафедрой
к.ф.-м.н.

 П.Ю. Михайлов
15.06. 2017 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ

03.04.02 Физика

Магистерская программа «Техническая физика в нефтегазовых технологиях»

Выполнил работу
Студент 2 курса магистратуры
очной формы обучения



Мозжегоров
Денис
Анатольевич

Научный руководитель
к.ф.-м.н.



Ширшова
Альбина
Вольфовна

Научный консультант
к.ф.-м.н.



Флягин
Виктор
Михайлович

Рецензент
руководитель группы
отдела АСУТП
ООО «Тюмень Прибор»



Герк
Алексей
Викторович

г. Тюмень, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| АННОТАЦИЯ | 4 |
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ | 9 |
| 1.1. Свойства и строение газовых гидратов | 9 |
| 1.2. Газовые гидраты в природе | 13 |
| 1.3. Экспериментальные исследования газовых гидратов | 15 |
| 1.4. Описание возможностей микроконтроллера PIC16F877A | 19 |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ | 21 |
| 2.1. Схема и принцип работы стенда «Исследование газовых гидратов» | 21 |
| 2.2. Внедрение автоматизированных средств измерения и управления | 24 |
| 2.3. Концепция системы сбора данных | 26 |
| 2.4. Универсальный микроконтроллерный блок | 27 |
| 2.5. Функциональный блок для датчика температуры | 29 |
| 2.6. Функциональный блок датчика давления | 33 |
| 2.7. Функциональный блок управления мощной нагрузкой | 35 |
| 2.8. Стабилизированный блок питания | 36 |
| 2.9. Измерение температуры внутри реактора | 37 |
| ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ | 39 |
| 3.1. Общие сведения | 39 |
| 3.2. Программное обеспечение микроконтроллера | 39 |
| 3.3. Программное обеспечение персонального компьютера | 44 |
| 3.4. Калибровка датчика давления автоматизированной системы сбора данных | 46 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Калибровка датчика температуры автоматизированной системы сбора данных..... | 48 |
| 3.6. Руководство по эксплуатации автоматизированной системы сбора данных..... | 50 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 54 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 56 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А..... | 58 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 60 |

АННОТАЦИЯ

В данной работе рассматривается реализация способа осуществления автоматизированного сбора данных установки по исследованию газовых гидратов. Целью работы является разработка и внедрение средств автоматизации с использованием микроконтроллерной техники для повышения качества проводимых экспериментов по росту и диссоциации газовых гидратов. Большое внимание было уделено методам измерения температуры, методам оцифровки сигнала с датчика давления, способам связи микроконтроллера и персонального компьютера, а также осуществлению возможности управления мощной нагрузкой. С помощью разработанной системы возможно минимизировать влияние человеческого фактора на ход эксперимента.

В первой главе описываются общие свойства газовых гидратов, выделяются основные параметры влияющие на кинетику роста и диссоциации газовых гидратов. Рассмотрены варианты экспериментального исследования газовых гидратов на установках НПО-5 и Газогидрат-3М.

Во второй главе представлено описание существующей установки по исследованию газовых гидратов Тюменского государственного университета, а также описаны основные моменты разработки системы автоматизированной системы сбора данных для данной установки.

Третья глава посвящена технической реализации автоматизированной системы сбора данных. Описаны принципы работы программного обеспечения микроконтроллера и персонального компьютера. Также представлены результаты калибровки средств измерений датчика температуры и датчика давления.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованием газовых гидратов на сегодняшний день занимаются многие передовые страны мира. Важнейшую роль в изучении газовых гидратов играют экспериментальные исследования их роста и диссоциации. Качество и чистота эксперимента определяют то, куда в дальнейшем может повернуться область исследования. Современная техника предоставляет обширный инструментарий для постоянного повышения качества получаемых в эксперименте результатов. Использование средств автоматизации зачастую способно вывести эксперимент на новый уровень.

При проведении экспериментальных исследований обычно производят измерение (наблюдение) и регулирование параметров исследуемой системы. Существуют эксперименты, проводящиеся с помощью таких средств измерения, которые не позволяющих устранить различные влияющие на эксперимент факторы. Например, в подавляющем большинстве экспериментов изучается зависимость измеряемого параметра от времени, однако для быстропротекающих процессов сложно производить регистрацию сразу двух, либо трех параметров вручную одному оператору. Отсюда повышается вероятность случайных ошибок, что может пагубно повлиять на результаты эксперимента. С другой стороны, для медленно протекающих процессов бывает просто невозможно производить измерения в течение всего эксперимента.

В существующей установке по исследованию газовых гидратов производится экспериментальное изучение роста и диссоциации газовых гидратов. Основным параметром при выращивании газового гидрата является давление. Измерение давления производится в автоматическом режиме, с помощью специальной системы сбора данных. Другой немаловажный параметр для изучения газовых гидратов – температура. Измерение температуры производилось с помощью ручного цифрового термометра, что не дает возможности в автоматическом режиме фиксировать изменение

температуры во время эксперимента. Кроме этого, большой интерес представляет температурное распределение внутри реактора с образующимся газовым гидратом.

Совместно с автоматизацией измерительных процессов существует необходимость в автоматизации процессов регулирования. Поддержание необходимого давления внутри реактора производится с помощью игольчатого вентиля отвечающего за подачу газа из газового баллона, который регулируется вручную оператором. Также, для проведения экспериментов по диссоциации газовых гидратов необходимо производить подвод тепла к выращенному газовому гидрату.

Актуальность

Высокая энергоемкость газогидратов, значимость глобального масштаба соединений газа и воды, и другие важные свойства этих соединений создают большой интерес к исследованиям газогидратов во всем мире. Однако, на данный момент, практическое использование газогидратных технологий во всем мире, а особенно в России, незначительно из-за недостаточной проработанности многих технических решений. Большой интерес представляют экспериментальные исследования газовых гидратов, их количество, а особенно качество и вариативность. Именно поэтому тема настоящей работы является актуально и имеет важное научно-практическое применений.

Цели и задачи работы

Целью работы является внедрение автоматизированной системы сбора данных в экспериментальной установке по исследованию газовых гидратов Тюменского Государственного Университета, включающую возможность измерения температуры, давления, а также возможность осуществления управления мощной нагрузкой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать концепцию и модель системы сбора данных;

- спроектировать и реализовать рабочую печатную плату с необходимым набором компонентов;
- разработать программного обеспечения микроконтроллера и программы-обработчика данных для персонального компьютера;
- тестирование, отладка, калибровка готового устройства.

Научная новизна работы

Для расширения теоретической базы определенной области науки необходимо иметь определенный объем количество экспериментальных исследований, причем качество исследований напрямую влияет на конечные теоретические выкладки.

В настоящей работе преследуется цель повысить качество проводимых экспериментов по исследованию газовых гидратов за счет использования микропроцессорной техники. Этим определяется новизна работы.

Степень проработки задач

Основой системы сбора данных служит микроконтроллер PIC16F877A фирмы Microchip со встроенной прошивкой, написанной на языке PicBasic. Конфигурация программы-обработчика данных на персональном компьютере реализована в виде функционирующего приложения, разработанного на языке Visual C#. В работе дана подробная инструкция для практического пользования системой, а также для дальнейшего возможного изменения или модернизации.

Практическая значимость работы. Система сбора данных в своей перспективе позволит значительно расширить область исследования газовых гидратов, расширить спектр проводимых экспериментов, их вариативность. Практическая ценность, таким образом, определена получением качественно новых экспериментальных данных.

Достоверность полученных результатов калибровки подтверждается использованием высокоточной измерительной аппаратурой.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской конференции молодых ученых «Математическое и информационное моделирование» г. Тюмень 2017 г.

Личный вклад. Автор принимал непосредственное участие в изготовлении автоматизированной системы сбора данных, ее настройке и калибровке, а также в разработке программного обеспечения контроллерной стороны, а также стороны персонального компьютера.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Свойства и строение газовых гидратов

Газовые гидраты - минералы, состоящие из молекул газа (метана, углекислого газа, азота и др.), заключенных в ячейки молекул воды, которые связаны между собой водородными связями и формируют каркасы с обширными полостями. Производя оценку, специалисты говорят, что на трети территории России возможны условия для накопления газовых гидратов природного газа. Охотское море, территории Якутии, дно озера Байкал, в Черном море и во многих других местах возможны месторождения газовых гидратов. В общей сложности запасы газогидратов и континентальной и шельфовой части оцениваются в 100-1000 трлн. Куб. м.

Проблема борьбы с образованием гидратов возникает при разработке большинства газовых и газоконденсатных месторождений. Особое значение этот вопрос приобретает при разработке месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера. Причиной этому являются суровые погодные условия и невысокие пластовые температуры в этих районах, которые и создают благоприятные условия для формирования гидратов не только в скважинах и газопроводах, но также и в пластах, в результате чего происходит образование газогидратных залежей.

Гидраты природных газов являются неустойчивым физико-химическим соединением воды с углеводородами. Газогидраты при повышении температуры либо при понижении давления разлагается на воду и газ. По внешнему виду клатраты газа представляют из себя белую кристаллическую массу, похожую на лед или снег.

Гидраты причисляются к веществам, в которых молекулы одних компонентов размещены в полостях кристаллической решетки между узлами ассоциированных молекул другого компонента [1]. Такие соединения обычно называют твердыми растворами внедрения, а иногда соединениями включения.

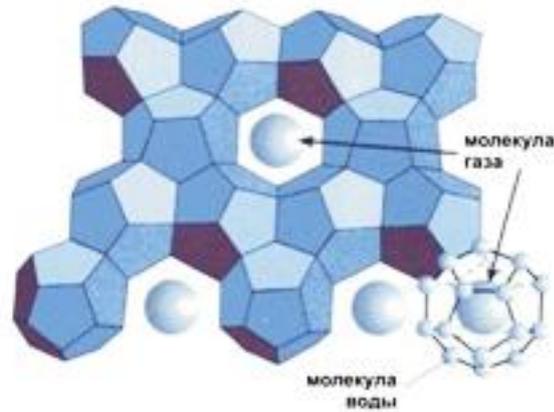


Рис. 1.1. Структура газового гидрата

Молекулы гидратообразователей в областях между узлами ассоциированных молекул воды гидратной решетки сдерживаются Ван-дер-Ваальсовыми силами притяжения. В общем виде состав газовых гидратов описывается формулой $M \cdot n \cdot H_2O$, где M — молекула газа-гидратообразователя, n — число молекул воды, приходящихся на одну включённую молекулу газа, причём n — переменное число, зависящее от типа гидратообразователя, давления и температуры. Число n принимает значения от 5,75 до 17 по причине различных составов газовых гидратов [1].

Помимо индивидуальных гидратов так же распространены двойные и смешанные (в состав которых входят несколько газов). Термодинамически стабильное соединение воды и газа требует определенное минимальное количество молекул газа: в чистом виде кристаллическая решетка, состоящая из молекул воды, в отличие от решетки льда, существовать не может. По своим физико-химическим свойствам газовые гидраты близки ко льду. Принципиальным отличием является то, что вода при замерзании и образовании льда увеличивается в объеме, при формировании гидрата из газа и воды общий объем напротив становится меньше.

Большинство компонентов природного газа, за исключением водорода, гелия, неона, нормального бутана и более тяжелых углеводородов, способно к образованию газовых гидратов [2]. Метан на данный момент является самым распространенным природным газом-гидратообразователем. Единица объема газового гидрата природного метана может содержать до 164 объемов газа.

Образование и существование газовых гидратов возможно при определенных условиях среды.

Обязательными для образования гидратов газа являются следующие три условия:

1. Необходимые термобарические условия. Низкая температура и высокое давление благоприятствуют образованию газовых гидратов.

2. Присутствие гидратообразующего вещества. К гидратообразующим веществам причисляются метан, этан, пропан, двуокись углерода и др.

3. Необходимое количество воды. Воды не должно быть ни слишком мало, ни слишком много.

Исключая любое из трех условий возможно предотвратить гидратообразование.

Следующие явления способствуют ускоренному росту газовых гидратов:

1. Турбулентность. Образование газовых гидратов активно протекает на участках с высокими скоростями потока среды. При перемешивании газа в трубопроводе, технологическом резервуаре, теплообменнике и т.п. интенсивность газогидратообразования возрастает.

2. Центры кристаллизации. Центром кристаллизации является точка, в которой имеются условия благоприятные для фазового превращения, а именно – образования твердой фазы из жидкой.

3. Свободная вода. Присутствие свободной воды не является обязательным условием для гидратообразования, однако интенсивность роста газовых гидратов значительно возрастает в присутствии свободной воды. Помимо этого, поверхность раздела фаз вода-газ может являться удобным центром кристаллизации для образования гидратов газа.

Немалое значение имеет также состав гидратообразующего газа и состав воды при образовании гидратов в природных условиях, помимо термобарических условий. Молекулы газа захватываются в структуру гидрата

избирательно: происходит фракционирование, и остаточная газовая фаза делается обогащенной молекулами газов плохо помещающихся в решетку из-за своих размеров. Вода в природе в любом случае хранит в себе определенное количество растворенных солей и имеет ту или иную минерализацию. Однако кристаллическая решетка газового гидрата создаётся только из молекул чистой дистиллированной воды, поэтому, как и в случае образования льда, оставшаяся не превратившаяся в лед вода всегда становится более минерализованной [2].

Изучение кинетики образования газовых гидратов ведется с начала шестидесятих годов двадцатого века, именно тогда В. Кнокс с соавторами выполнил основополагающие исследования скорости образования гидрата пропана. После этого была проведена масса исследований кинетики образования водных клатратов многих веществ, в том числе и гидратов природных газов. Следует, однако, отметить, что значительное множество экспериментальных исследований кинетики выполнено, главным образом для целей химической технологии, и именно поэтому проводились они в реакторах с размешивающими устройствами. Данный факт зачастую затрудняет либо делает вообще невозможным перенесение результатов подобных исследований на реальные природные условия.

Механизмам и скорости гидратообразования в статических условиях, которые в наибольшей степени моделируют природные условия, отдано относительно мало работ. В мировой литературе крайне мало сведений об исследованиях скорости гидратонакопления в дисперсных породах. Однако, имеющаяся на сегодняшний день информация может позволить выявить основные особенности и закономерности кинетики образования и разложения газовых гидратов.

Морфология газогидратов чрезвычайно разнообразна. В настоящее время выделяют три главных типа кристаллов [3]:

- Массивные кристаллы. Данный тип кристаллов создается за счёт сорбции газа и воды на всей поверхности постоянно растущего кристалла;

- Вискерные кристаллы. Могут зарождаться при туннельной сорбции молекул к ядру растущего кристалла;
- Гель-кристаллы. Формируются в объёме воды из растворённого в ней газа при достижении условий гидратообразования.

В пластах горных пород гидраты могут быть как распределены в виде микроскопических включений, так и образовывать крупные частицы, вплоть до протяжённых пластов многометровой толщины.

Из-за своей клатратной структуры объём газового гидрата может содержать в себе до 160—180 объёмов чистого газа. Плотность гидрата несколько ниже плотности воды и льда (плотность гидрата метана составляет около 900 кг/м³) [4].

1.2. Газовые гидраты в природе

До середины 30-х годов XX в. исследования газовых гидратов носили только академический характер. Советский ученый профессор Иван Николаевич Стрижев в 1946 г. первым предсказал возможность существования залежей газогидратов в природе [5].

В начале 60-х годов академики А.А. Трофимук и Н.В. Черский с коллегами начали активно заниматься геологическими аспектами формирования газогидратов как на суше, так и под водой. Открытие в 1971 г. способности природного газа образовывать в недрах Земли залежи в твердом гидратном состоянии стало результатом работы коллектива советских ученых (Ю.Ф. Макагон, Ф.А. Требин, А.А. Трофимук, Н.В. Черский, В.Г. Васильев).

На месторождении Предхо Бей на Аляске в 1972 г. с глубины 665 м впервые были подняты гидратосодержащие мерзлые керны. Постепенно стало выясняться широчайшее распространение гидратов газа в океанах (рис. 1.2).

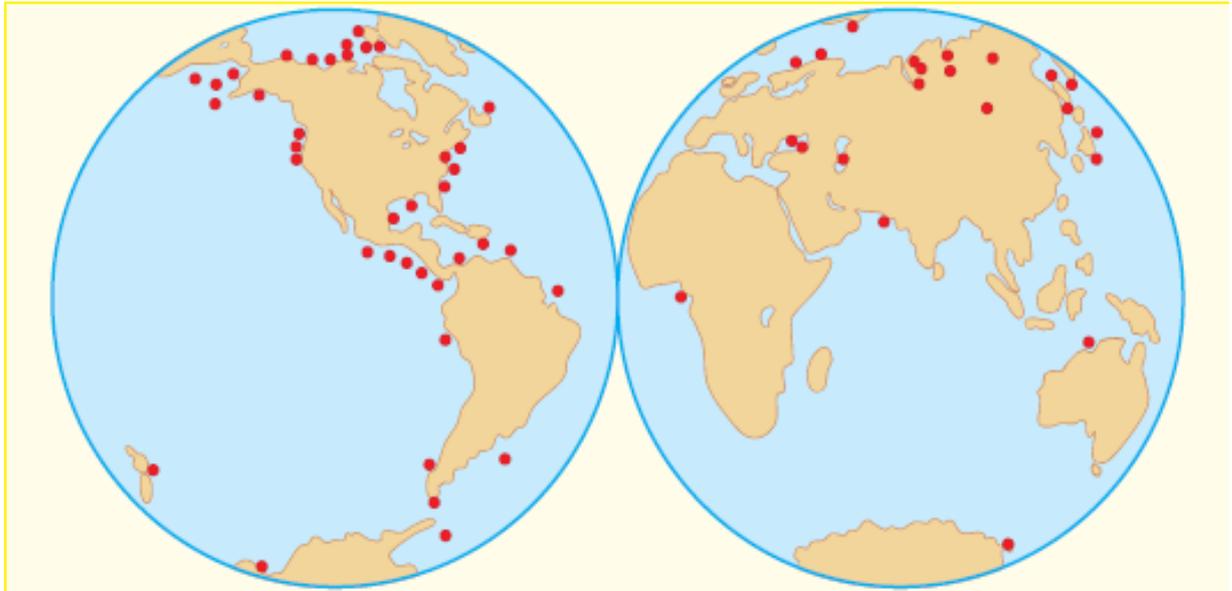


Рис. 1.2. Расположение на земном шаре разведанных месторождений газогидратов.

Судя по всему, большая часть гидратов сосредоточена на материковых окраинах, там, где глубина вод составляет приблизительно 500 метров. Вода в этих зонах выносит органический материал и содержит питательные вещества для бактерий, которые и могут выделять метан в результате своей жизнедеятельности.

Обычная глубина залегания природных газогидратов – 100-500 метров ниже морского дна, хотя иногда их находят и на морском дне. Газогидраты могут присутствовать и на меньших глубинах, так как температура на поверхности ниже, например, в районах с развитой многолетней мерзлотой. Крупные залежи газогидратов были обнаружены на шельфе Японии, в районе Блейк Ридж к востоку от морской границы США, на материковой окраине района каскадных гор около Ванкувера (Британская Колумбия, Канада) и на шельфе Новой Зеландии. Большая часть данных о нахождении гидратов получена косвенным путём, посредством сейсмических исследований, ГИС, по результатам измерений во время бурения, по изменению минерализации поровой воды [7].

По предварительным оценкам, на суше содержится $4 \cdot 10^{13}$ - $3,4 \cdot 10^{16}$ м³, а под водой - $3,1 \cdot 10^{16}$ - $7,6 \cdot 10^{18}$ м³ газа в гидратном состоянии. По

современным средневзвешенным оценкам, запасы газа в газогидратных залежах - около $2,1 \cdot 10^{16}$ м³ [8]. Всего 10% этого объема вдвое превысит сегодняшние мировые запасы традиционного природного газа. Для сравнения - годовая добыча природного газа в США составляет $\sim 5 \cdot 10^{11}$ м³.

Приблизительно 35% территории России занимают районы распространения вечномёрзлых пород, которые имеют благоприятные условия для образования природных гидратов. В этом отношении наиболее перспективными районами поиска, разведки и освоения газовых гидратов являются Западная Сибирь (район Мессояхского и Восточно-Мессояхского месторождений), северное побережье Сибири (дельты рек Лена и Енисей), Западная Якутия и полуостров Ямал.

После открытия Мессояхского месторождения газогидраты были обнаружены под многолетнемёрзлыми породами (ММП) в северных районах России, Аляски и Канады.

Было доказано, что процесс гидратообразования на морском дне имеет глобальный характер – в шельфовых зонах и прибрежных склонах на небольших глубинах они встречаются практически на любых широтах [9]. Именно высокий потенциал газовых гидратов как источника энергии побудил многие страны приступить к осуществлению программ изучения и разведки, дабы найти залежи природных гидратов и начать их промышленное освоение.

1.3. Экспериментальные исследования газовых гидратов

Существуют различные варианты экспериментальных установок по исследованию газовых гидратов. Во всех из них искусственно создаются термобарические условия для роста гидратов газа.

В лабораторной установке НПО-5 днепропетровского национального горного университета в качестве холодильного блока используется климатическая камера "ILKA" КТК-3000 для поддержания и регулирования температуры и влажности. Камера позволяет проводить исследования в различных температурных режимах и с различной влажностью. В данной

установке выделяются четыре основные части: рабочий объем, щит управления, холодильный агрегат и парогенератор.

Рабочий объем выполнен в виде шкафа с расположенными внутри теплообменниками для обеспечения режимов лабораторных испытаний. Камера имеет дверь со смотровым окном и систему защиты от обмерзания. Корпус камеры крепится на жесткую колесную раму из стального профиля. Тормозные колодки на колесах предотвращают самопроизвольные перемещения камеры во время работы.

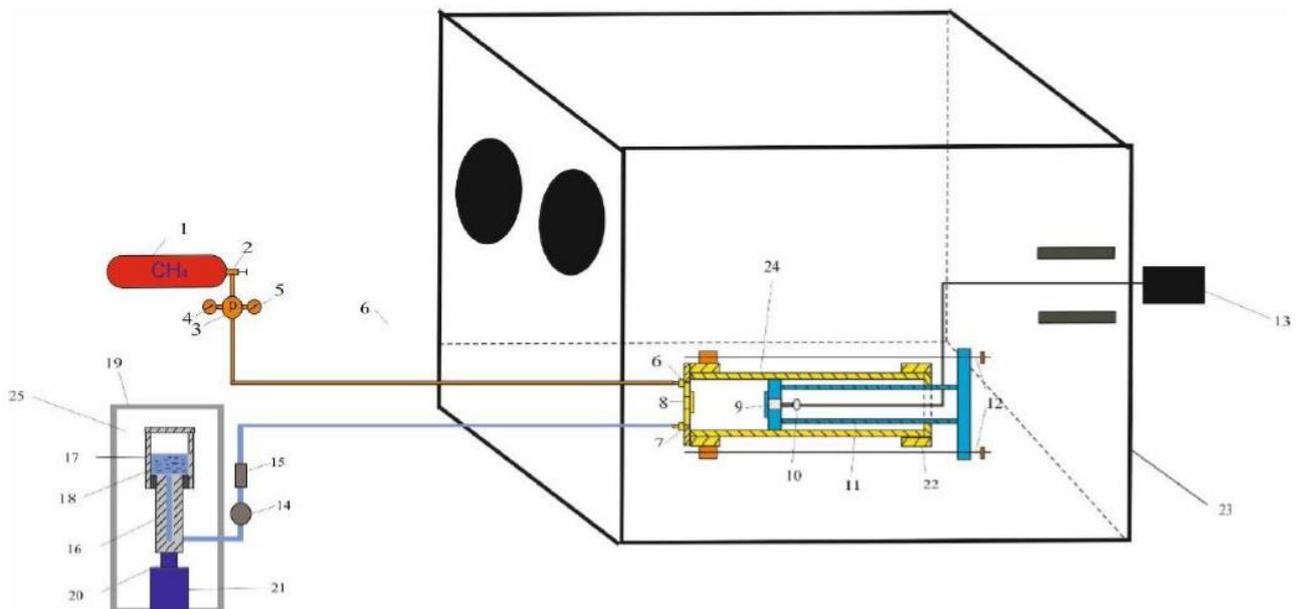


Рис. 1.3. Схема установки по исследованию газовых гидратов НПО-5

Холодильный агрегат выполнен на съемной монтажной плите, которая находится внутри камеры. Снаружи агрегат закрыт кожухами, обеспечивающими свободный доступ воздуха для охлаждения устройств холодильной машины.

Эксперимент проводится следующим образом: в холодильную камеру помещают специальный прибор для формирования газовых гидратов, который формирует полезный объем от 0,05 до 2 литров. С внешней стороны камеры устанавливается агрегат для подачи воды под давлением 25 и газовый баллон с 51 метаном 1.

В начале эксперимента шток 11 вставляется в прибор 24 до упора и закрепляется стяжными болтами с гайками. Параллельно монтируется агрегат 26: в шток агрегата давления воды 16 наливается определенное количество воды и он вставляется в цилиндр 17 на корпус гидродомкрата 21. Климатермокамера 23 приводится в рабочий режим с установлением температуры до нужного значения и в сеть включается светодиодная лампа 10. С помощью раскочки гидродомкрата 21 в цилиндре 17 повышается давление до нужного значения. Открывается вентиль 15 и параллельно с ним открывается вентиль баллона 2, т.е. подача воды и газа в рабочий объем специального прибора 24 осуществляется параллельно.

Давление воды регулируется величиной выхода штока гидродомкрата 20, а давление газа – редуктором 3. Для определения давлений на газовом и водяном шлангах установлены манометры: 14 – для воды, 4 и 5 – для газа.

Газ и вода одновременно поступают в прибор 25 через штуцер ввода воды 7 и газа 6, отодвигая шток 11 до положения, регулируемого стяжными болтами с гайками 12. Вода и газ образуют водогазовую смесь, заполняющую пространство штока 11, которая при заданном давлении и температуре образует газовый гидрат. При этом достигается максимальный эффект увеличения скорости образования газогидрата, т.к. показатель активности взаимодействия молекул газа с молекулами воды достигает своего наивысшего значения.

Процесс образования газовых гидратов наблюдается визуальным путем через прозрачное окно 8. Также существует возможность видеонаблюдения за процессом гидратообразования с помощью настольного компьютера и видеокамеры.

Для регистрации параметров процесса строится таблица, отражающая следующие показания: время начала процесса гидратообразования, время окончания эксперимента, временной интервал между замерами, изменение температуры в камере (если меняется), изменение давления газа и воды во времени. Показания записываются каждые 30 мин. При этом на компьютере

регистрируются фотоснимки процесса, происходящего в приборе каждые 30 с либо каждую минуту. Фотоснимки дают возможность визуально оценить на какой стадии формирования находится газовый гидрат и при необходимости изменить термобарические параметры процесса.

Другой вариант экспериментальной установки для исследования газовых гидратов представлен в российском государственном университете нефти и газа имени И.М. Губкина имеет название Газогидрат-3М.

Установка предназначена для изучения газовых гидратов, как в двухфазной: газ-вода, так и в трехфазной смеси: нефть-газ-вода. Установка предоставляет возможность визуально наблюдать образование и разрушение гидратов в объеме при изотермическом (постоянная температура) или изохорном процессе (постоянный объем), имеется возможность перемешивать исследуемую смесь, моделируя движение жидкости по трубам, а также возможно осуществлять автоматический сбор данных измеряемых параметров. В состав установки входит пакет ПО и компьютер.

Области применения данной установки:

1. Получение равновесных кривых гидратообразования;
2. Испытания ингибиторов гидратообразования;
3. Испытания катализаторов гидратообразования;
4. Разделение газовых смесей гидратным методом;
5. Опреснение солевых растворов;
6. Возможность проведения вышеперечисленных работ в насыпной пористой среде.

Основными направлениями установки Газогидрат-3М являются фундаментальные и прикладные исследования газовых гидратов, в том числе изучение разделения газовых смесей с помощью процессов образования газовых гидратов, разработка методов газогидратного селективного выделения отдельных компонентов (гелий, пропан, бутан, углекислый газ, сероводород) из газовых смесей, исследование кинетики процессов замещения в газовых гидратах, изучение газогидратных равновесий в многофазных

системах, исследование кинетических и термодинамических ингибиторов гидратообразования, разработка кинетических ингибиторов гидратообразования, разработка методов ускорения образования газовых гидратов.

Установка гидратообразования

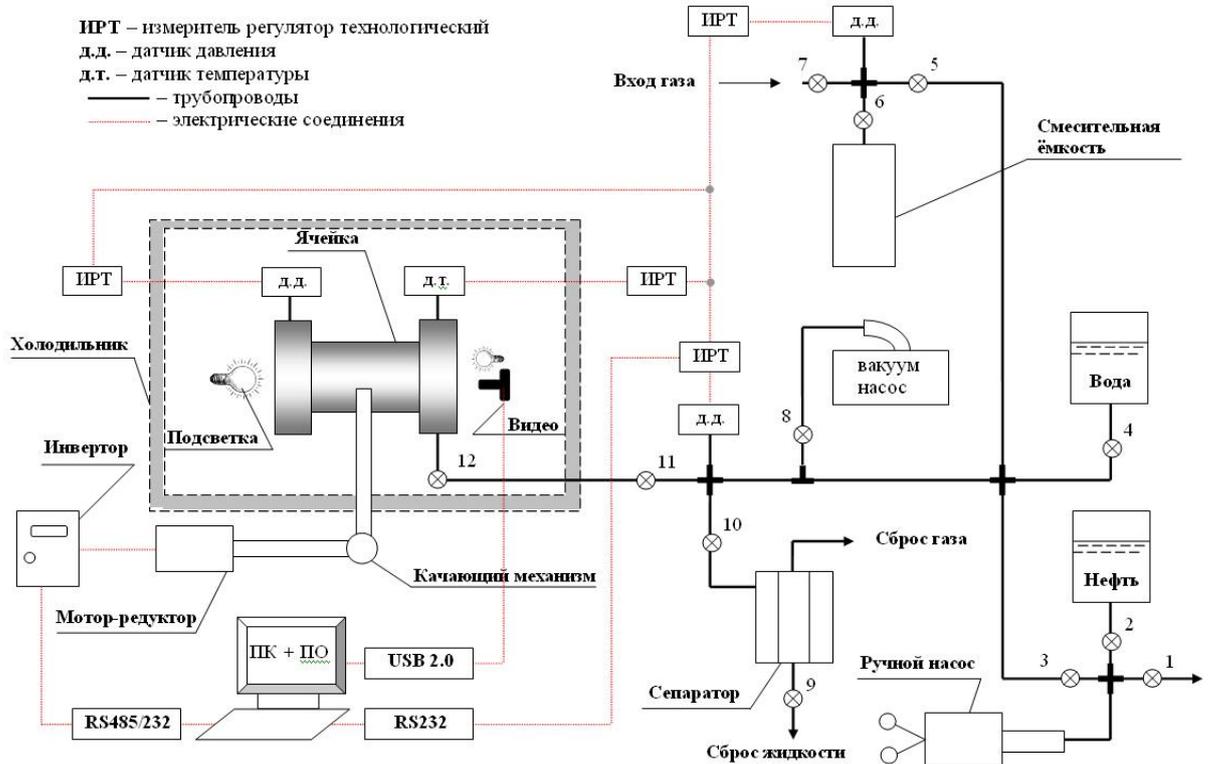


Рис. 1.4. Схема установки по исследованию газовых гидратов Газогидрат-3М.

1.4. Описание возможностей микроконтроллера PIC16F877A

PIC-контроллеры остаются популярными в тех случаях, когда требуется создать недорогую компактную систему с низким энергопотреблением, не предъявляющую высоких требований по ее управлению. Эти контроллеры позволяют заменить аппаратную логику гибкими программными средствами, которые взаимодействуют с внешними устройствами через порты последовательной передачи данных.

Миниатюрные PIC контроллеры хороши для построения сетей с помощью преобразователей интерфейса TTL-USB либо TTL-RS232 последовательной передачи данных, для реализации функций «прием – обработка – передача данных» и несложных регуляторов систем автоматического управления.

Также, данный микроконтроллер может иметь в зависимости от настраиваемой конфигурации до 8 аналоговых входных каналов с 10-разрядным аналогово-цифровым преобразованием [10].

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

2.1. Схема и принцип работы стенда «Исследование газовых гидратов»

Исследование гидратообразования в пористых средах проводится на стенде «Исследование газогидратов» кафедры механики многофазных систем Физико-технического института ТюмГУ. Экспериментальная установка была создана в 2007 году. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1.

Основная часть установки по исследованию газовых гидратов - это термостатируемая камера (реактор-кристаллизатор) который имеет регулируемую систему подачи газа, а также измерительная аппаратура по контролю за температурой и давлением. Экспериментальная установка рассчитана на давления до 1,6 МПа и температуру до минус 40°C. Главным элементом экспериментальной установки является реактор (6) высокого давления, именно в нём при контролируемых условиях либо образуются, либо диссоциируются газогидраты. Внешний контур реактора изготовлен из плексигласа, по-другому его название - ячейка. Ячейка имеет форму цилиндра с объемом около 294 см³ и герметизируется фланцевым соединением. Толщина стенки ячейки составляет 12 мм, данный факт даёт возможность работать при достаточно высоких давлениях, необходимых для поддержания термобарических условий образования газового гидрата. В ячейку помещается реагент (вода, нефть, водонефтяная эмульсия) и закачивается газ (пропан).

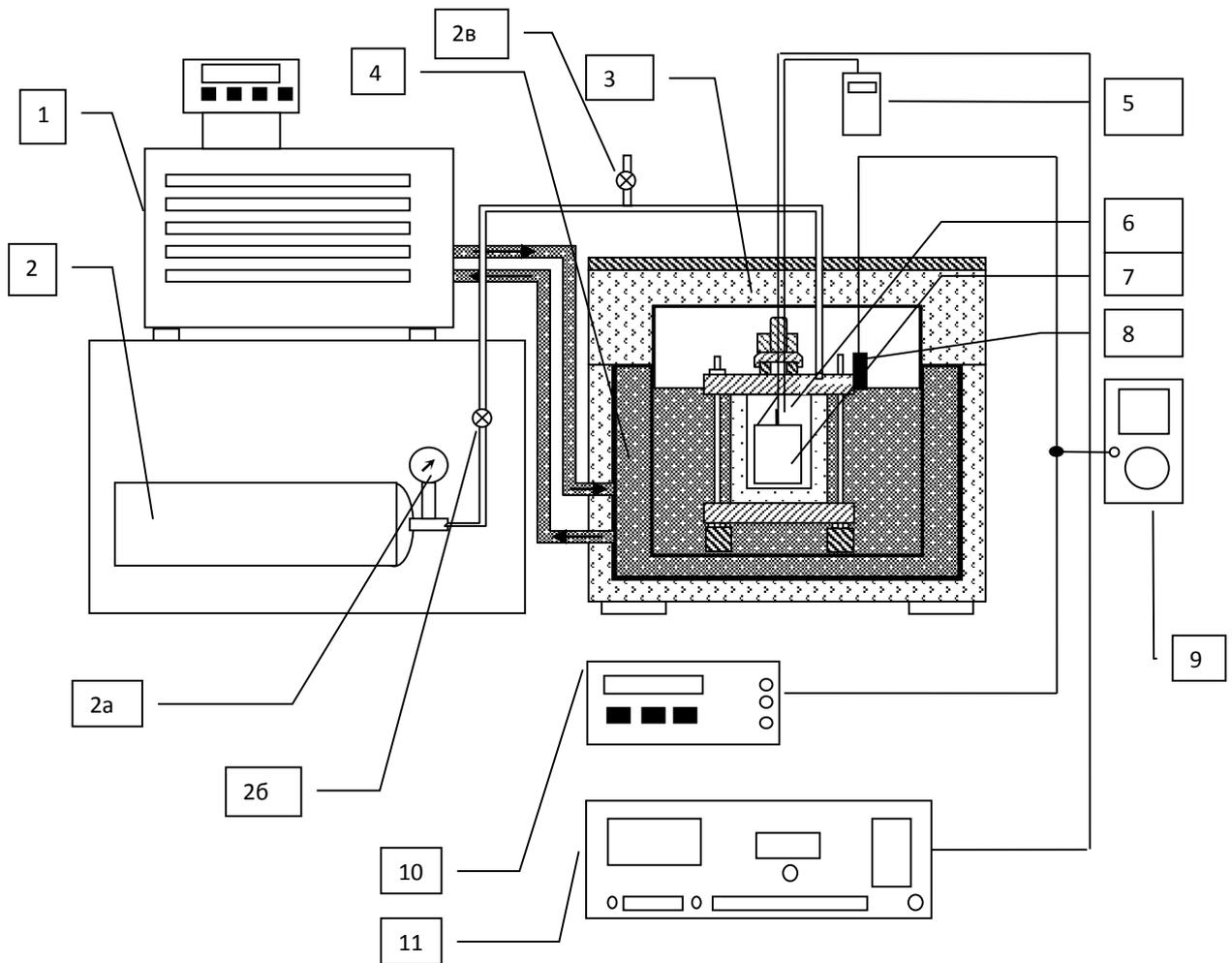


Рис. 2.1. Общая схема установки до модернизации, где

1 – термостат KRIO-VT-01; 2 – баллон с газом; 2a - редуктор; 2б,2в – игольчатые вентили для контроля давления; 3 – крышка теплообменника; 4 – первый контур теплообменника; 5 – термистр; 6 – реактор; 7 – цилиндрический конденсатор; 8 – датчик давления; 9 – мультиметр; 10 – источник тока для датчика давления; 11 – куметр.

Для образования гидратов в ячейке реактора необходимо поддерживать определённый диапазон и температур, и давлений.

Для повышения, понижения и поддержания температуры реактора используется термостат KRIO-VT-01 (1). Температура в реакторе контролируется термопреобразователем (5) Checktemp 1, имеющем контрольный щуп, которым и производится съём величины температуры. Checktemp 1 в конечном итоге заменяется на полупроводниковые датчики температуры, используемые в системе сбора данных.

С помощью вентиля (2в) возможно понижать давление либо же полностью стравить газ, не прибегая к разбору реактора. Для мягкой регулировки давления в установке использовались игольчатые вентили (2б, 2в) WHITEY SWAGELOK, рассчитанные на давление 50 атм. Конструктивной особенностью данной экспериментальной установки существует возможность поддерживать постоянное давления на протяжении длительного отрезка времени. Поэтому в конструкции используются фитинговые соединения. Подобные соединения позволяют выдерживать давления до 80 атм. Контролирует давление датчик (8), который крепится к реактору на отдельном патрубке. Схема подключения приведена на рис.2.2.

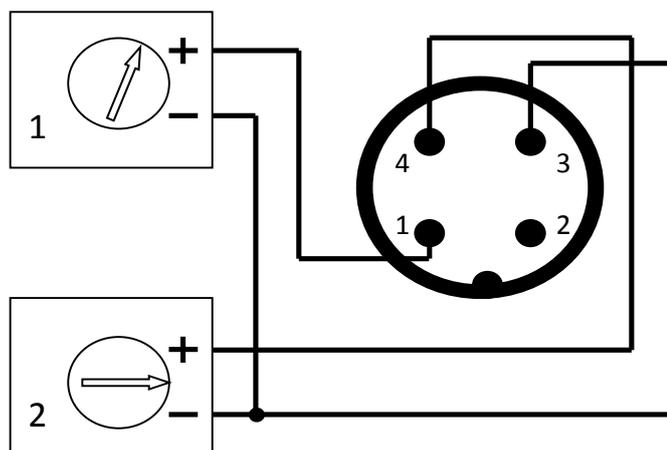


Рис. 2.2. Схема подключения датчика давления, где 1-источник постоянного тока с пределами по напряжению 10÷20 В; 2- измерительный прибор.

Датчик давления дает токовый сигнал в диапазоне 4...10 мА. Данные показания снимаются через определенный отрезок времени и записывались вручную. Интервалы съема данных по давлению устанавливаются этапом процесса гидратообразования и, обычно, это значения времени 3, 5 или 10 минут. Получать данные вручную через 1 минуту в течение одного цикла практически невозможно.

После проведения эксперимента газ из системы стравливается при помощи открытия крана, который позволяет плавно сбрасывать давление в реакторе.

2.2. Внедрение автоматизированных средств измерения и управления

На начальном этапе эксплуатации установки по исследованию газовых гидратов измерения проводились вручную, что значительно влияло на качество получаемых данных. Ручная запись данных не исключала человеческий фактор, не всегда было возможно точно определить измеряемое значение давления, а временное значение для регистрируемой точки просто не могло точно совпадать с реальным значением – оператору требовалось время для определения значения давления и текущего времени на разных приборах, что приводило к большой погрешности измерения времени. К тому же, процесс роста газового гидрата длителен, что затрудняло получение большого массива экспериментальных данных со строго выдерживаемым временным промежутком между измерениями, и делало практически невозможным запись данных в ночное время.

Для минимизации человеческого фактора, на базе микроконтроллера PIC16F877A была создана система сбора данных, способная управлять всем экспериментальным процессом выращивания газового гидрата, параметры которого можно задавать с помощью программы на персональном компьютере.

Средства современной микропроцессорной техники позволяют проводить достаточно точные измерения с помощью встроенных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). В используемом микроконтроллере PIC16F877 АЦП имеет разрядность 10 бит, что в случае стандартного измерительного диапазона 0...5 В соответствует приборной погрешности ± 0.25 В, а 8 аналоговых входов позволяют проводить до 8 измерений

различных физических величин с периодичностью до 1000 измерений в секунду.

Непосредственному подключению датчика физической величины (давления, температуры) мешает несоответствие уровня выходного сигнала датчика и входного диапазона блока АЦП. Так, например, для качественного аналогово-цифрового преобразования необходим диапазон напряжения не меньше порядка 2.5 В, но многие средства измерения имеют унифицированный токовый выходной сигнал 4-20 мА. В таком случае удобно воспользоваться преобразователями тока с последующим усилением, и получить необходимое пропорциональное току напряжение для проведения аналогово-цифрового преобразования.

Существует также ситуация при которой устройства выдают гораздо больший или гораздо меньший уровень.

Регулировку параметров и управление установкой удобно осуществлять с помощью дискретных выходов микроконтроллера. В существующей установке по исследованию газовых гидратов таким образом управляется нагревательный элемент внутри реактора для увеличения скорости диссоциации газовых гидратов.

Для хранения большого объема измеренных величин собственная память микроконтроллера не подходит – объем памяти данных ограничен, как правило, несколькими килобайтами. Возможно подключение внешнего массива памяти для промежуточного хранения данных, но для оперативного контроля и управления установкой гораздо лучшим вариантом является прямой канал связи с персональным компьютером.

Существенным достоинством современных микроконтроллеров является наличие в них аппаратного блока последовательной передачи данных. Последовательный порт позволяет использовать микроконтроллер как ведомое устройство, а управление производить с ПК. Все произведенные измерения можно передать во внутреннюю память ПК и в дальнейшем производить с полученными данными любые действия – записывать в файл,

отображать в виде графика, либо просто выводить полученное значение на экран.

Для взаимодействия с микроконтроллером по последовательному порту используется либо COM-порт ПК, либо преобразователь USB. В существующей системе сбора данных установки по исследованию газовых гидратов за прием данных на ПК и управление установкой отвечает программа, написанная на Visual C#. С помощью неё отправляются через последовательный порт запросы на передачу данных на микропроцессор. Затем происходит процесс приема данных. Пакет данных расшифровывается, полученные данные аналого-цифрового преобразования преобразуются в значения физических величин, и выводятся на экран в цифровом виде и в виде графика, а также записываются в память компьютера в создаваемый программой файл. Интерфейс программы представлен на рисунке 1. С помощью Visual C# возможно создавать достаточно сложные системы сбора данных и диспетчерского контроля, и с помощью них управлять микропроцессором или сетью микропроцессоров.

2.3. Концепция системы сбора данных

Система сбора данных установки по исследованию газовых гидратов должна отвечать определенным требованиям, таким как: универсальность, простота обслуживания, масштабируемость, возможность автоматизированного измерения давления, возможность измерения температуры как минимум одной точки, возможность управления мощной нагрузкой, обмен данными с персональным компьютером, обработка данных на персональном компьютере.

Универсальная система сбора данных позволит не ограничивать применимость лишь одной экспериментальной установкой. Масштабируемость позволит не ограничивать систему сбора данных определенным количеством датчиков. Автоматизация измерения давления и температуры являются важнейшим критерием для изучения процесса роста и

диссоциации газовых гидратов, однако и в других областях данные параметры имеют важное значение, что также не исключает универсальность разработанной системы сбора данных. Управление мощной нагрузкой позволит производить управление исполнительными механизмами, что значительно упростит процесс экспериментального исследования. Связь с персональным компьютером позволит развернуть подобие диспетчерского центра.

В качестве устройства, отвечающего за автоматизацию установки как уже отмечалось ранее, применяется микроконтроллер PIC16F877A, способный удовлетворить всем выдвигаемым требованиям.

Для того, чтобы в полной мере раскрыть возможности микроконтроллера, используется модульная система в основе которой лежит универсальный микроконтроллерный блок, который коммутирует головное устройство и функциональные блоки, которые отвечают за преобразование входных и выходных сигналов.

2.4. Универсальный микроконтроллерный блок

Плата универсального микроконтроллерного блока представляет из себя готовое устройство, оборудованное необходимыми компонентами для организации биполярного питания, опорного напряжения, а также на плате находятся специальные слоты для подключения микроконтроллера PIC16F877A и функциональных модулей. Кроме того, плата имеет полный набор необходимых слотов для подключения внешних датчиков для дальнейшей обработки сигнала.

Данное решение является универсальным из-за своей неограниченности в применимости. В зависимости от цели и места использования данного блока, варьируя программное обеспечение микроконтроллера, дополняя устройство необходимыми функциональными блоками позволит применять его для автоматизации абсолютно любых экспериментальных установок, не ограничиваясь установкой по исследованию газовых гидратов. Однако,

конкретно описываемый тип системы сбора данных предназначен именно для автоматизации процесса исследования роста и диссоциации газовых гидратов.

Обобщенная структурная схема универсального микроконтроллерного блока представлена на рисунке 2.3. Головное устройство, коим является микроконтроллер PIC16F877A, располагается в левой части. Там же находятся индикаторные светодиоды, места для ввода нестабилизированного питания и подключения интерфейсного кабеля для осуществления обмена информацией с персональным компьютером. Правее головного устройства располагаются корзины для подключения функциональных блоков. Корзин восемь, что означает возможность подключения восьми различных устройств. В правой части универсального микроконтроллерного блока расположены контакты для подключения внешних датчиков и исполнительных устройств. Необходимое для питания устройств биполярное напряжение получается с помощью стабилизаторов, размещенных в верхней части устройства. Все необходимые коммутации произведены на фольгированном текстолите, на которой и монтируются используемые компоненты.

Индикаторные светодиоды позволяют отслеживать состояние оборудования. Моргание зеленого светодиода сверху означает прием и передачу данных через последовательный порт. Зеленый светодиод по середине отвечает за общую работы системы. Если он горит зеленым цветом, значит система в работе. Красный светодиод говорит о работе нагревательного элемента, находящего внутри реактора.



Рис. 2.3. Обобщенная структурная схема универсального микроконтроллерного блока

Маска для изготовления печатной платы универсального микроконтроллерного блока представлена в приложении А. Реальные фотографии готового микроконтроллерного блока приведены в приложении Б.

2.5. Функциональный блок для датчика температуры

Температура является важным параметром не только для конкретной установки для исследования газовых гидратов. В разработанном устройстве в качестве датчиков температуры применяются кремниевые диоды, имеющие свои достоинства и недостатки как датчики температуры [12].

Достоинства:

- Температурный диапазон. Полупроводниковые датчики температуры можно использовать для измерения температуры от -55°C до 150°C ;
- Линейность температурной характеристики. Зависимость падения напряжения на р-п переходе от температуры является линейной функцией, что значительно упрощает обработку выходного сигнала с датчика;

- **Стабильность.** Полупроводниковые датчики температуры обладают высокой стабильностью параметров при долговременном измерении температуры [13];
- **Дешевизна и доступность.** Полупроводниковые датчики температуры имеют невысокую стоимость, по сравнению с другими датчиками, например, с резистивными датчиками температуры;
- **Малые размеры.** Полупроводниковые датчики температуры являются сравнительно маленькими устройствами, размер которых обычно не превышает 5 мм в наибольшем измерении. Данный факт позволяет использовать полупроводниковые датчики температуры в местах с ограниченным пространством и нет возможности использовать датчики температуры другого типа.

Недостатки:

- **Разброс первоначальных параметров.** В связи с особенностями изготовления полупроводниковых датчиков, каждый датчик отличается от других своими первоначальными характеристиками;
- **Саморазогрев.** В зависимости от протекающего тока, кристалл в полупроводниковом датчике может нагреваться [13];
- **Низкий температурный коэффициент напряжения.** Средний температурный коэффициент напряжения для кремниевых диодов равняется - 2,5 мВ/°С.

Низкий температурный коэффициент напряжения вынуждает использовать либо высокоточные аналогово-цифровые преобразователи для получения более точного результата, либо производить преобразование падения напряжения для получения уровней, близких к уровням опорного напряжения АЦП. Поскольку микроконтроллер PIC16F877A позволяет использовать опорное напряжение не менее 2 В, в данной системе сбора данных применяется функциональный модуль для преобразования уровней падения напряжения на полупроводниковом датчике, что позволяет добиться высокого разрешения получаемых измерений температуры.

В действующей установке по исследованию газовых гидратов в качестве датчика температуры используется кремниевый диод. Падение напряжения на диоде линейно зависит от температуры при стабильном значении протекающего через него тока. При комнатной температуре падение напряжения на диоде примерно равно 0,6 В [14]. Изменение температуры в ту или иную сторону приведет к изменению падения напряжения.

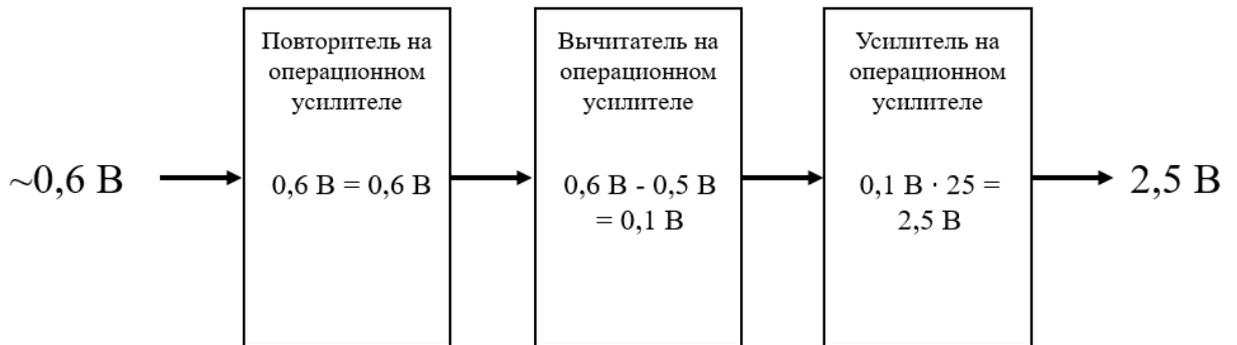


Рис. 2.4. Обобщенная схема работы функционального блока для датчика температуры

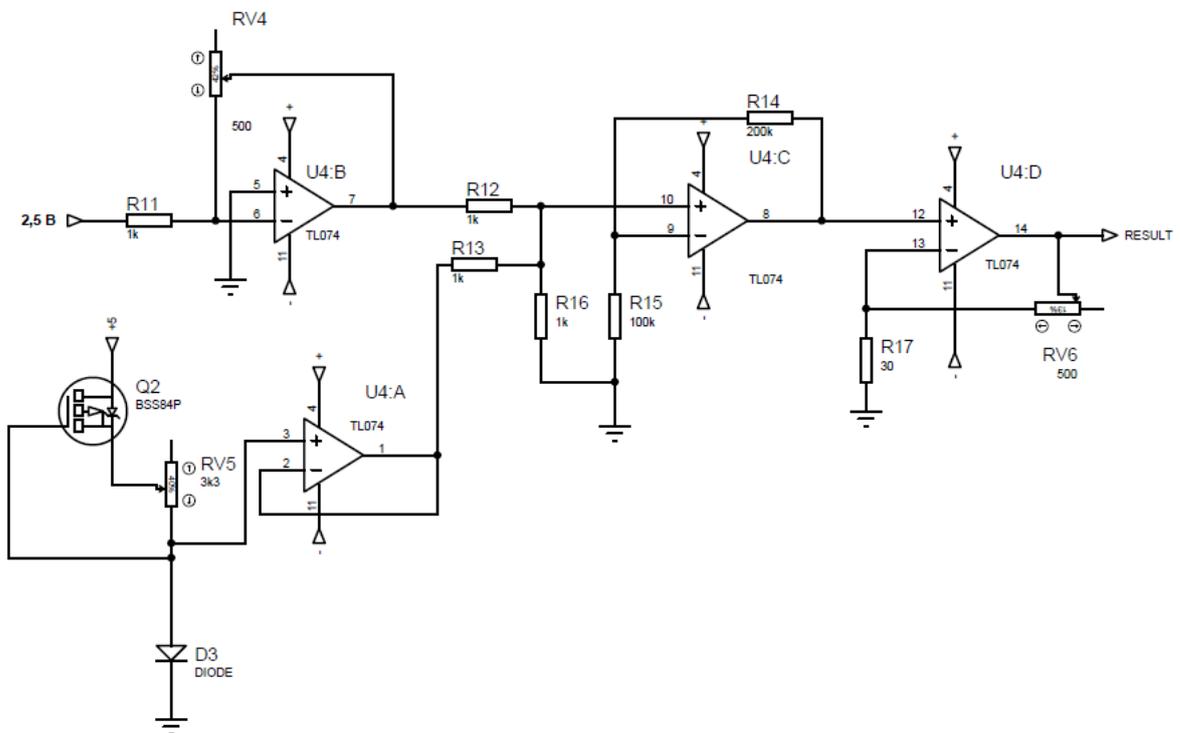


Рис. 2.5. Принципиальная схема функционального блока для датчика температуры

Для увеличения разрешения при заранее известном измеряемом диапазоне температур необходимо выбрать область измерения, «обрезая» падение напряжения на диоде под диапазон АЦП. Для этого в существующей установке применено преобразование падения напряжения с помощью операционных усилителей (ОУ). ОУ способны производить достаточно большое количество математических (суммирование и разность, умножение на константу, детектирование максимумов и минимумов, и многие другие) операций с сигналом напряжения. Так, зная, что при максимальной измеряемой температуре падение напряжения на диоде будет равно 0.5 В, а при минимальной соответственно 0.7 В, что соответствует разнице примерно 100°C, можно преобразовать уровни выходного сигнала диода под уровни АЦП – 0 В и 2.5 В соответственно. При 10 разрядном АЦП разрешение в таком случае получается около 0.1°C. Расчет теоретического шага измерения давления, получаемого с помощью полупроводниковых датчиков температуры приведен в формулах 2.1, 2.2 и 2.3.

$$\Delta U_{\text{АЦП}} = \frac{2,5}{1024} = 0,0024 \text{ В} \quad (2.1)$$

$$\frac{\Delta U}{^\circ\text{C}} = \frac{2,5}{100} = 0,025 \text{ В}/^\circ\text{C} \quad (2.2)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta U_{\text{АЦП}}}{\Delta U/^\circ\text{C}} = \frac{100}{1024} \approx 0,1^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

Таким образом, можно видеть, что производя преобразование сигнала с помощью функционального блока возможно изменять коэффициенты k и b , для линейно зависимых величин, которой в данном конкретном случае является зависимость падения напряжения на полупроводниковом датчике температуры от температуры этого датчика.

Маска для изготовления печатной платы универсального микроконтроллерного блока представлена в приложении А. Реальные фотографии готового микроконтроллерного блока приведены в приложении Б.

2.6. Функциональный блок датчика давления

Для оцифровки и передачи сигнала датчика давления необходимо преобразовать токовый сигнал в напряжение такого уровня, который будет достаточным для проведения аналого-цифрового преобразования. Датчик давления (transmitter s-10 компании WIKA) при рабочих давлениях от 1 до 4 атм. дает токовый сигнал до 10 мА, прямо пропорциональный величине давления.

Последовательное включение датчика давления в цепь с источником питания и амперметром (либо прибором, его заменяющим, рис. 13) накладывает ограничение на схему преобразования тока в напряжение. Сопротивление резистора, на котором проводится измерение падения напряжения при прохождении через него тока датчика, должно быть незначительным по сравнению с сопротивлением самого датчика, и не должно вносить серьезные искажения в измеряемый сигнал. С другой стороны, слишком малое сопротивление преобразователя ток-напряжение приведет к тому, что значения напряжения на нем будет сравнимо с тепловыми шумами и/или электромагнитными наводками. Поэтому в качестве преобразователя выбран резистор сопротивлением 4.3 Ом, что больше, чем сопротивление проводов и монтажа, но много меньше сопротивления датчика (сопротивление резистора составляет 0.1% от сопротивления датчика при давлении 4 атм.). Не сложно посчитать, что при таком сопротивлении резистора и протекающем через него токе 10 мА падение напряжения будет составлять 43 мВ.

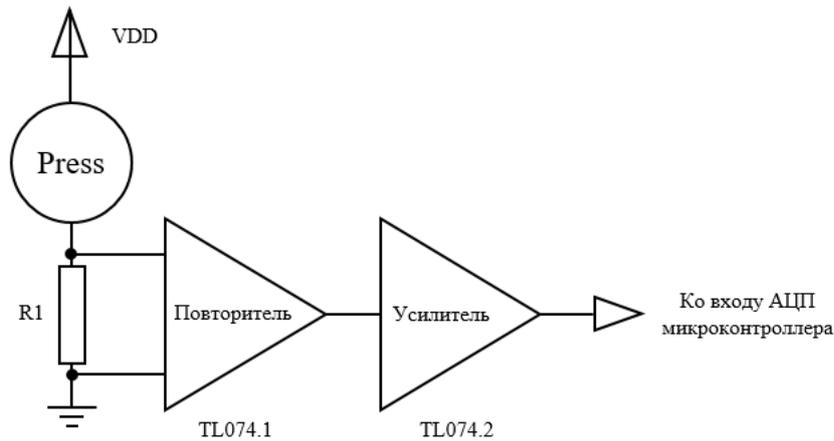


Рис. 2.6. . Обобщенная схема работы функционального блока для датчика давления

Для оцифровки с помощью аналого-цифрового преобразователя падение напряжения на резисторе нужно усилить на такую величину, чтобы максимум напряжения достигал значения 4...5 В. Для этой цели используются операционные усилители способные повысить уровень падения напряжения до необходимых значения для проведения АЦП. Кроме того, для повышения точности измерений к аналого-цифровому преобразователю подключается источник опорного напряжения, формирующий уровень напряжения, соответствующий максимальному значению цифровой величины (255 для 8-разрядного АЦП, или 1023 для 10-разрядного АЦП).

В функциональном блоке измерения давления используется два прецизионных операционных усилителя, один из которых является не инвертирующим повторителем ток потребления которого ничтожно мал, а второй операционный усилитель играет роль не инвертирующего усилителя, который и преобразует сигнал до необходимых значений. Не инвертирующий усилитель оборудован подстроечным резистором, что позволяет задавать необходимое усиление.

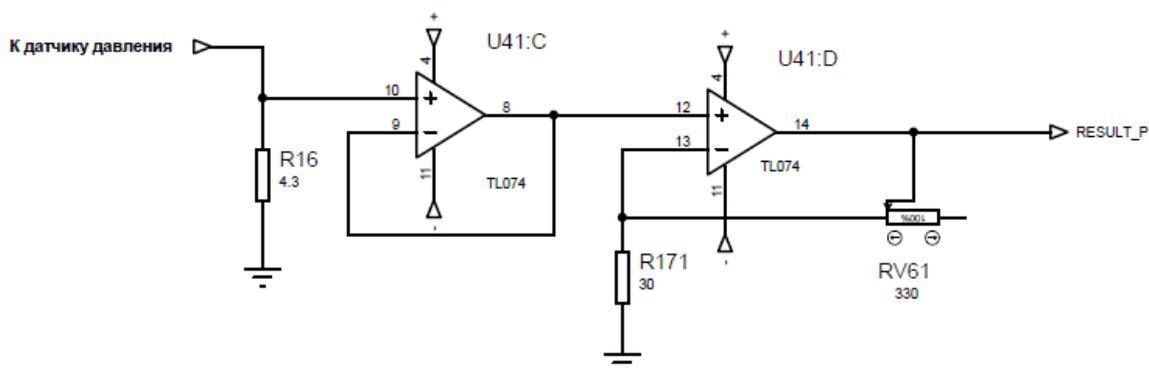


Рис. 2.7. Принципиальная схема функционального блока для датчика температуры

Маска для изготовления печатной платы универсального микроконтроллерного блока представлена в приложении А. Реальные фотографии готового микроконтроллерного блока приведены в приложении Б.

2.7. Функциональный блок управления мощной нагрузкой

Используя дискретные выходы микроконтроллера возможно управлять исполнительными устройствами, в данном случае это нагревательный элемент внутри реактора для увеличения скорости диссоциации газовых гидратов.

Однако многие исполнительные устройства требуют гораздо больший ток и напряжение, чем те, которые могут обеспечить микроконтроллеры. Например, чтобы управлять электромеханическим клапаном линии подачи газа, требуется напряжение 24 В и ток до 600 мА. Данную задачу легко решает специализированный МДП-полевой транзистор с управлением логическим уровнем, который практически не потребляет ток управляющего вывода микроконтроллера, но способен коммутировать большие величины токов и напряжений.

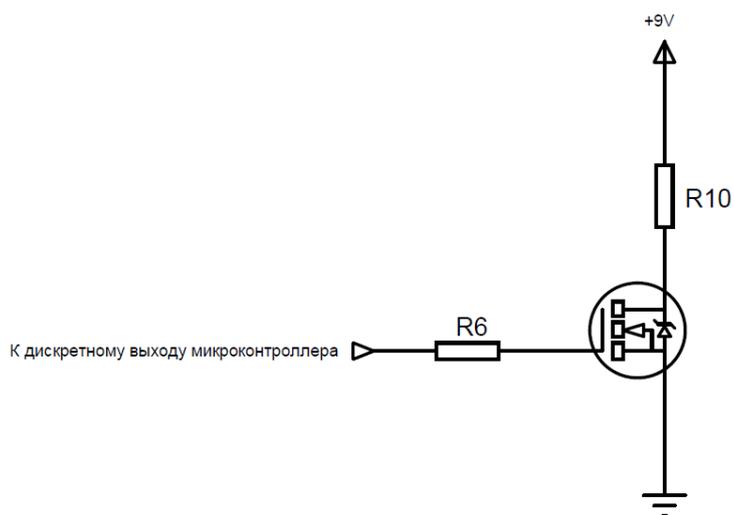


Рис. 2.8. Принципиальная схема функционального блока управления нагрузкой

Маска для изготовления печатной платы универсального микроконтроллерного блока представлена в приложении А. Реальные фотографии готового микроконтроллерного блока приведены в приложении Б.

2.8. Стабилизированный блок питания

Для питания схемы автоматизированной системы управления понадобятся стабилизированные напряжения с различными уровнями. Питание блока микроконтроллера осуществляется напряжением + 5 В, которое возможно получить от интегрального стабилизатора 7805 [16].

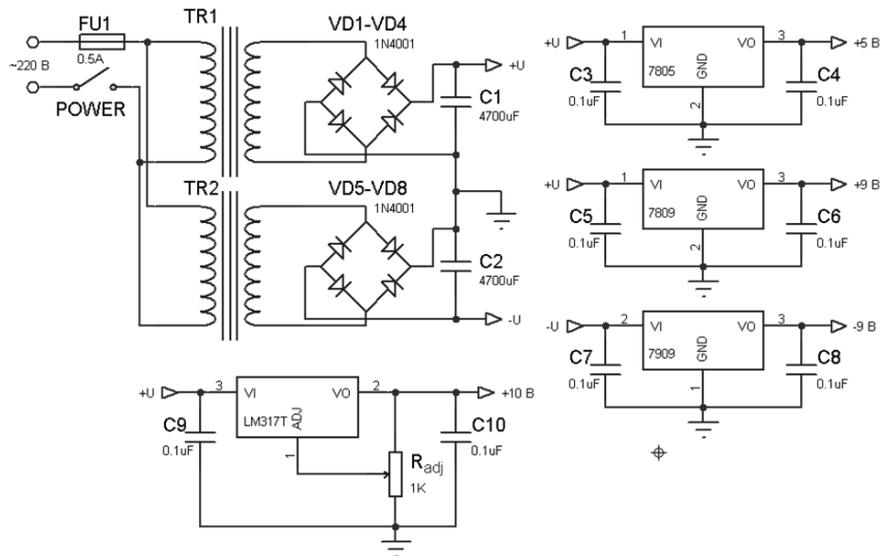


Рис. 2.9. Схема блока питания ССД

Для реализации двуполярного питания, которое обязательно для стабильной работы операционных усилителей, применяются парные интегральные стабилизаторы 7809 и 7909. С их помощью формируются напряжения $+8.88\text{ В}$ и -8.89 В . Питание цепи датчика давления осуществляется от отдельного стабилизатора напряжения, построенного на интегральном стабилизаторе LM317, и настроенного на выходное напряжение 10.00 В . Схема блока питания показана на рис. 19.

2.9. Измерение температуры внутри реактора

Одной из задач работы была измерение температуры внутри камеры с образующимся газовым гидратом. Миниатюрные размеры полупроводниковых датчиков температуры позволили разместить четыре датчика температуры на достаточно близком расстоянии друг от друга. При этом между вторым и третьим датчиками расположен греющий резистор номиналом 5 Ом , пуская ток по которому возможно создавать точечный источник тепла прямо внутри реактора с образовавшимся газовым, способствуя тем самым его диссоциации.

Сама линейка с расположенными на ней датчиками температуры и греющим резистором свободно помещается в реактор. Кабель, который герметично входит в реактор, создает электрическую связь с

автоматизированной системой управления установкой. Схема расположения полупроводниковых датчиков температуры и нагревательного резистивного элемента приведена на рисунке 2.10.



Рис. 2.10. Расположение активных элементов на линейке измерения

ГЛАВА 3. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

3.1. Общие сведения

Конечная реализация системы была произведена в виде двух отдельных блоков, которые можно условно назвать «питание» и «голова». Оба блока отвечают за свою часть работы, дополняя друг друга. Такая реализация имеет ряд преимуществ, среди которых высокая мобильность, удобство эксплуатации, ремонтпригодность, а также меньшее количество шумов на плате, отвечающей за аналогово-цифровое преобразование.

На одной из плат в отдельном корпусе находятся два трансформатора, которые параллельно подключены к сети питания 220В. Диодный мост в цепи после двух трансформаторов отвечает за нестабилизированное биполярное напряжение с общей землей. Напряжение с диодного моста идет на второй блок, где организовано аналогово-цифровое преобразование и передача сигнала на ПК.

На второй плате, которая также находится в отдельном корпусе, расположены стабилизаторы, отвечающие за напряжение питания ОУ, микропроцессора и датчика давления. Соответственно там же находятся и остальные элементы, участвующие в аналогово-цифровом преобразовании и передаче сигнала на ПК.

Габаритные размеры получившихся устройств: корпус блока питания 125 мм в ширину и длину, 85 мм в высоту. Длина корпуса с микропроцессором 210 мм, ширина – 150 мм, а высота 70 мм.

3.2. Программное обеспечение микроконтроллера

Разработанное программное обеспечение микроконтроллера отвечает за работу системы сбора данных и предоставляет необходимый функционал. Для данной ССД был выбран язык программирования PicBasic, который

полностью удовлетворяет всем требованиям, раскрывая потенциал микроконтроллеров Pic [17].

Рассмотрим подробнее программу, реализующую сбор данных, отправку их в ПК, а также иное управление установкой. В самом начале программного кода указывается наименование микроконтроллера, а также частота используемого кварца, без которого работа невозможна.

```
Device =16F877A
```

```
Xtal=20
```

В следующем блоке задаются параметры АЦП, который встроен в данный микроконтроллер. Adin_Res, Adin_Tad, Adin_Stime – отвечают соответственно за разрешение АЦП, частоту оцифровки и за время установления.

```
Declare Adin_Res = 10
```

```
Declare Adin_Tad = FRC
```

```
Declare Adin_Stime = 50
```

Важно указать, что микроконтроллер будет еще и передавать данные, прописав параметры для передачи.

```
Declare Hserial_Baud = 9600
```

```
Declare Hserial_Clear = On
```

Крайне необходимо указать какие порты будут за что отвечать и что еще следует задействовать в микроконтроллере. В нашем случае порт А будет задействован как порт входных данных, а порт В и порт D задействованы как дискретные выходы. Здесь указываем о передаче сигнала и опорном напряжении.

```
TRISC = %10000000
```

```
SPBRG = 32
```

```
TRISA = %11111111
```

```
TRISB = %00000000
```

```
TRISD = %00000000
```

```
ADCON1 = %10000001
```

```
OPTION_REG = %00000000
```

В следующей части программы присутствует блок, отвечающий за переменные. Не трудно понять, что для данной программы было задано 2 переменных типа Byte отвечающие за прием команды от персонального компьютера, массив переменных типа Word, отвечающий за хранение данных АЦП, массивы типа Byte, предназначенные для создания пакетов для передачи данных по последовательному порту, переменная i служит счетчиком для циклов, а переменная heat хранит данные о состоянии греющего резистора.

```
Dim in As Byte
```

```
Dim command As Byte
```

```
Dim AI[6] As Word ' Результаты АЦП
```

```
Dim i As Byte
```

```
Dim heat As Byte
```

```
Dim vPLow[6] As Byte ' Нижняя часть пакета
```

```
Dim vPHigh[6] As Byte ' Верхняя часть пакета
```

Блок инициализации программы обнуляет дискретные выходы, а также зажигает светодиоды состояния ССД.

```
PORTB.2 = 1
```

```
PORTB.1 = 0
```

```
PORTB.4 = 0
```

```
PORTC.1 = 0
```

В основном блоке программы прописывается основной алгоритм работы устройства:

```
GoTo main
```

```
main:
```

```
AI[0] = ADIn 0
```

```
AI[1] = ADIn 1
```

```
AI[2] = ADIn 4
```

```
AI[3] = ADIn 5
```

```
AI[4] = ADIn 6
```

```

AI[5] = ADIn 7
For i=0 To 5 Step 1
vPHigh[i] = AI[i] >> 8
vPLow[i] = AI[i] - (vPHigh[i] << 8)
Next
in = 0
HSerIn 1000, main,[ in ]
command = in - 48
Select command
Case 1
PORTC.1 = 1
PORTB.4 = 1
Case 3
PORTC.1 = 0
PORTB.4 = 0
EndSelect
HSerOut [in, in, heat, vPHigh[0], vPLow[0], vPHigh[1], vPLow[1],
vPHigh[2], vPLow[2], vPHigh[3], vPLow[3], vPHigh[4], vPLow[4],
vPHigh[5], vPLow[5]]
DelayMS 100
GoTo main

```

Сначала следует команда оцифровка аналоговых сигналов со всех датчиков, заполняется массив значений с АЦП. Далее осуществляется процедура разбиения полученных значений на два байта, при этом заполняются соответствующие элементы массивов с разбитыми данными. После этого микроконтроллер ожидает команду от персонального компьютера в течении 1 секунды командой HSerIn. При получении данных, контроллер записывает их в переменную «in», после этого преобразует полученное значение в цифровую форму и производит действия, указанные в команде персонального компьютера. При направлении команды «1» выполняется

включение мощной нагрузки, а также индикаторного светодиода, который дублирует включенную нагрузку. Команда «3» гасит нагрузку и светодиод. Параллельно с этим происходит работа с переменной «heat».

После выполнения процедур, связанных с отправленной командой, формируется ответный пакет, хранящий всю необходимую информацию в доступном для передачи виде. Блок-схема алгоритма работы микроконтроллера представлена на рисунке 3.1.

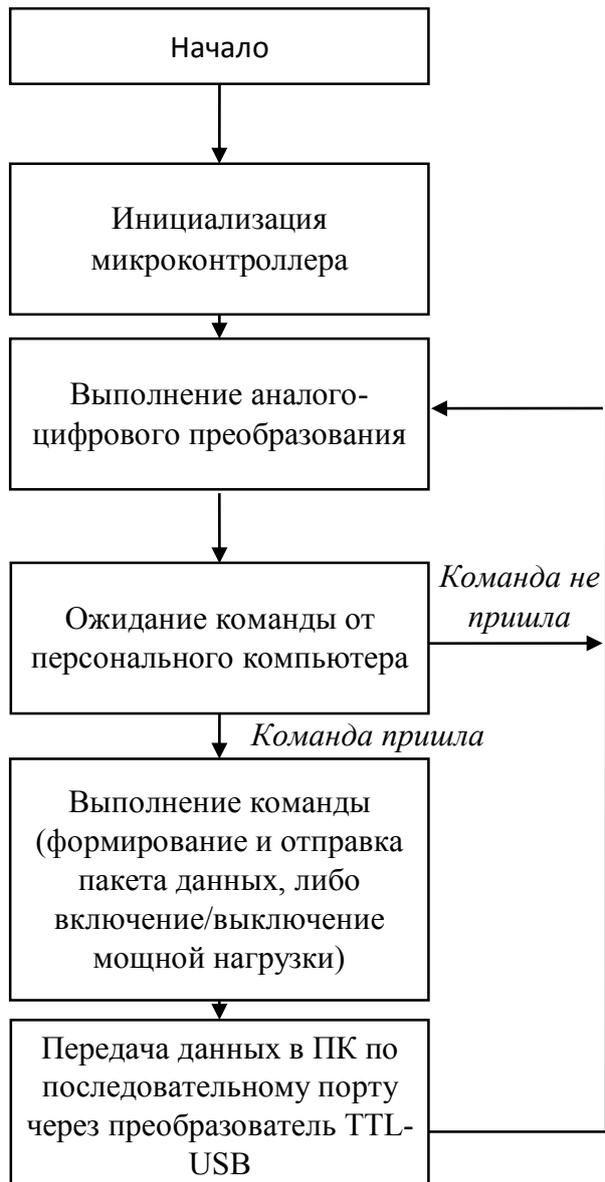


Рис. 3.1. Блок-схема программы микроконтроллера.

3.3. Программное обеспечение персонального компьютера

Важной частью автоматизации является обработка получаемых данных. За это отвечает программное обеспечение, которое запускается на персональном компьютере. Данное программное обеспечение позволяет визуально отслеживать протекание эксперимента, производить автоматическую запись регистрируемых данных, задавать параметры стенда, выдавать команды на управление исполнительными механизмами, а также оно обязано отвечать за связь с самой системой сбора данных.

Для разработки программного обеспечения автоматизации процесса экспериментального исследования был выбран язык программирования Visual C# [18], который полностью удовлетворяет всем требованиям, имея весь необходимый функционал.

Основной вид окна программы для персонального компьютера представлен на рисунке 3.2. В правой части экрана можно наблюдать графики, отображающие изменение параметров в реальном времени. Верхний график отвечает за отображение значений давления, нижний за отображение значений температур. График, отвечающий за отображение значений температур позволяет отображать изменения всех возможных измеряемых температурных датчиков. Выбор датчиков осуществляется с помощью отметки в специальном поле, расположенном справа от показаний цифровых моментальных значений температур.

По середине экрана расположена мнемосхема установки по исследованию газовых гидратов. Схематично изображен реактор (серый цвет), область термостатирования (голубой цвет), датчики температуры (зеленый символ диода) и их моментальные показания, датчик давления (зеленый круг) и его моментальные показания, а также кнопка управления мощной нагрузкой, отвечающая за управление питанием греющего резистора, который помещается внутри реактора.

В левой части экрана расположен журнал принятых пакетов данных, который отображает значения АЦП с датчиков, а также время, в которое

пришел пакет от системы сбора данных. В левом верхнем углу располагается область общих настроек системы. При нажатии на кнопку «Подключиться» произойдет попытка подключения к системе сбора данных через указанный справа от кнопки COM-порт. Там же отображается место записи файла с регистрируемыми данными.

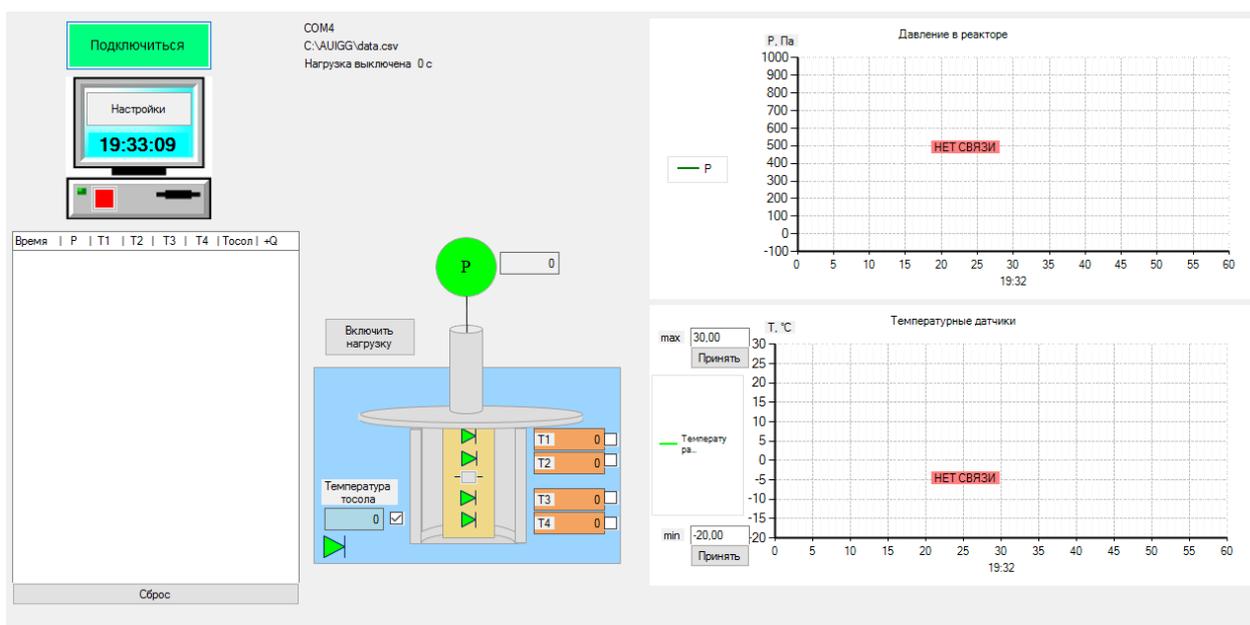


Рис. 3.2. Вид основного окна программы-обработчика данных для персонального компьютера

При нажатии на кнопку «Настройки» откроется окно позволяющие задавать параметры системы сбора данных представленное на рисунке 3.4. В данном окне возможно задавать COM-порт через который будет происходить подключение к системе сбора данных, а также начало имени файла, в который будет производиться запись регистрируемых данных. Система автоматически при создании файла добавит к имени дату и час создания файла.

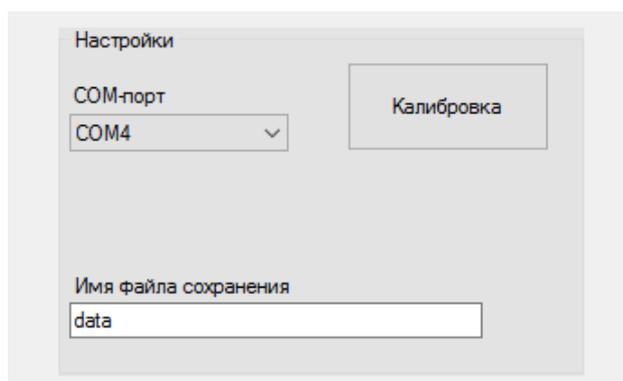


Рис. 3.4. Вид основного окна программы-обработчика данных для персонального компьютера

Кнопка «Калибровка» предназначена для тонкой настройки датчиков системы сбора данных, задания коэффициентов и уравнений преобразования АЦП в реальные значения температур и давления.

Калибровка датчиков

| | |
|---|---|
| <p>Датчик давления</p> <p>k: 1</p> <p>b: 0</p> <p>$P=1x+(0)$</p> | <p>Температура тосола</p> <p>k: 1</p> <p>b: 0</p> <p>$T=1x+(0)$</p> |
| <p>Температурный датчик №1</p> <p>k: 1</p> <p>b: 0</p> <p>$T=1x+(0)$</p> | <p>Температурный датчик №2</p> <p>k: 1</p> <p>b: 0</p> <p>$T=1x+(0)$</p> |
| <p>Температурный датчик №3</p> <p>k: 1</p> <p>b: 0</p> <p>$T=1x+(0)$</p> | <p>Температурный датчик №4</p> <p>k: 1</p> <p>b: 0</p> <p>$T=1x+(0)$</p> |

Принять

Рис. 3.5. Вид основного окна программы-обработчика данных для персонального компьютера

По умолчанию система отображает значения АЦП, однако при задании коэффициентов преобразования система будет выводить на экран реальные преобразованные значения температуры и давления.

3.4. Калибровка датчика давления автоматизированной системы сбора данных

Разработанную систему после отладки программного кода необходимо подвергнуть калибровке. Для калибровки датчика давления использовался образцовый манометр ТМ-5 класса точности 1.5, который был предоставлен Тюменским центром стандартизации метрологии и сертификации.

Также, для сравнения, была проведена калибровка ручного мультиметра для качественного сравнения результатов. Результатом калибровки стали

формулы линейной зависимости давления газа в реакторе от измеряемой величины, в случае автоматической системы сбора данных это относительные единицы АЦП (А) – формула (3.1), в случае мультиметра это токовый сигнал (I) – формула (3.2).

$$P = 0,8326 \cdot A - 292 \quad (3.1)$$

$$P = 79 \cdot I - 275,7 \quad (3.2)$$

Полученные в результате калибровки данные позволяют оценить абсолютную (Δ) и приведенную (γ) погрешности измерений. Результаты калибровки показаны в таблицах 1 и 2. По итогам расчета погрешностей, было выявлено, что приведенная погрешность для модуля автоматического измерения давления не превышает 1%, а с использованием цифрового мультиметра 2%. Необходимо также учесть, что точность измерения времени на автоматической установке на порядок выше.

Таблица 1. Результаты калибровки. Абсолютная и приведенная погрешности измерения давления с помощью мультиметра.

| Р, кПа (обр) | А, отн. ед | Р, кПа (измеряемое) | Δ | γ , % |
|--------------|------------|---------------------|----------|--------------|
| 0 | 347 | 3 | -3 | 0,70 |
| 140 | 524 | 144 | 4 | 0,97 |
| 240 | 642 | 242 | 2 | 0,57 |
| 305 | 715 | 303 | -2 | 0,38 |
| 380 | 805 | 378 | -2 | 0,40 |

Таблица 2. Результаты калибровки. Абсолютная и приведенная погрешность измерения давления с помощью мультиметра.

| Р, кПа (обр) | I, мА | Р, кПа (измеряемое) | Δ | γ , % |
|--------------|-------|---------------------|----------|--------------|
| 0 | 3,53 | 3 | 3 | 0,72 |
| 140 | 5,3 | 143 | 3 | 0,68 |
| 240 | 6,5 | 237 | -3 | 0,50 |
| 305 | 7,4 | 309 | 4 | 0,89 |
| 380 | 8,4 | 388 | 8 | 1,80 |
| 440 | 9,1 | 443 | 3 | 0,73 |

Таким образом, с внедрением автоматизированной системой сбора данных уменьшилась погрешность измерения основных величин измерения давления, а процесс измерения стал намного удобнее и проще.

3.5. Калибровка датчика температуры автоматизированной системы сбора данных

Поскольку в данной системе сбора данных используются полупроводниковые датчики температуры с возможностью изменения входного сигнала с помощью подстроечных резисторов, необходимо выбрать эталон, с помощью которого можно произвести тонкую настройку и калибровку измеряющего устройства.

Для получения экспериментальной зависимости падения напряжения на диоде от его температуры необходимо с высокой точностью задавать и контролировать температуру диода. Температура контролировалась лабораторными термометрами ТЛ-2 и ТЛ-6. Поскольку падение напряжения на диоде при увеличении температуры уменьшается, то первым делом задается точка верхнего диапазона измерений, такой точкой является величины температуры равная 100°C . Полупроводниковый датчик температуры и термометр помещаются в одну термостатируемую емкость с тосолом, где задается необходимая температура. При достижении температуры в 100°C с помощью подстроечных резисторов задается нулевой уровень поступающего в аналоговый вход микроконтроллера сигнала, который выходя с функционального блока температурного измерения попадает на аналоговый вход микроконтроллера. После этого задается вторая точка калибровки. При работе с полупроводниковыми датчиками температуры крайне удобным является факт калибровки лишь по двум точкам, поскольку падение напряжения линейно зависит от температуры на всей области измерения.

Второй точкой калибровки следует выбрать значение температуры 0°C . Данная точка удобна тем, что достаточно легко задать именно такое значение

температуры с помощью замороженной воды, льда. При достижении 0°C падение напряжения на диоде пропорционально повысится, в это время будет необходимо с помощью второго подстроечного резистора задать уровень усиления. Сигнал следует усилить до значения опорного напряжения АЦП, что позволит в полной мере охватить то разрешение, которое может обеспечить микроконтроллер. Однако не обязательно производить усиление до крайних значений опорного напряжения, если есть необходимость производить измерения температуры ниже нуля градусов по Цельсию. Например, при 10 разрядном АЦП, нижний предел измерений возможно выстроить при значения АЦП равным 100 единицам.

Эксперимент проводили в следующей последовательности: датчик температуры, погружали в тосол так, чтобы часть длины провода (около 10 см) также находилась в тосоле. Таким образом уменьшалось влияние высокой теплопроводности меди, часть которой находилась при комнатной температуре. После погружения диод выдерживали в тосоле около минуты для стабилизации температуры, и только после этого начинали съем данных.

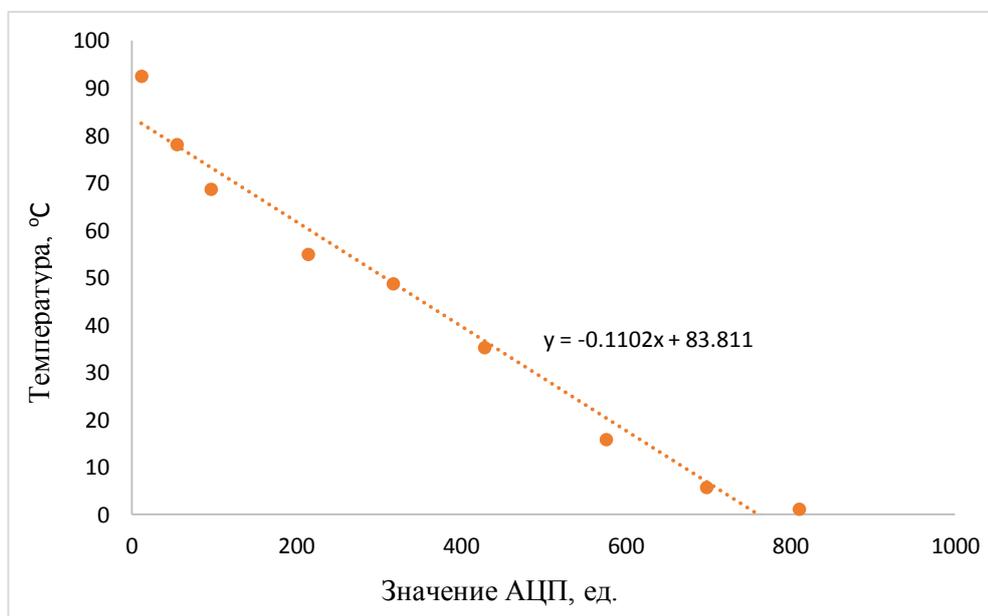


Рис. 3.6. График результатов калибровки датчика температуры

Результаты калибровки датчика температуры изображены на рисунке 3.6, и показывают высокую стабильность измерений температуры во времени.

3.6. Руководство по эксплуатации автоматизированной системы сбора данных

Для начала работы с автоматизированной системой сбора данных установки по исследованию газовых гидратов необходимо произвести подключение всех используемых средств измерений, проверить правильность подключения блока питания к универсальному микроконтроллерному блоку на соответствие полярности, подключить преобразователь TTL-USB к USB порту компьютера с установленной программой-обработчиком данных. Следует проверить, какой именно COM-порт использует преобразователь TTL-USB и указать его корректный номер в параметрах настройки программы-обработчика.

На корпусе универсального микроконтроллерного блока присутствуют все необходимые контакты, штекера и разъемы для подключения полного набора датчиков. В полный набор входят: датчик давления, датчик температуры тосола, линейка с датчиками температуры и резистивным греющим элементом, помещаемая во внутрь реактора. Подключение датчика давления осуществляется через черную и красную клеммы, расположенные со стороны подключения всех измерительных устройств. Необходимо определить полярность датчика давления, а затем его контакты подключить к указанным клеммам. Датчик температуры тосола подключается в разъем, показанный на рисунке 3.7. Данный разъем находится с той же стороны, что и клеммы подключения датчика давления.



Рис. 3.7. Общий гнезда для подключения полупроводникового датчика температуры измерения температуры тосола

Соединение линейки, оборудованной датчиками температуры и резистивным греющим элементом, для удобства эксплуатации осуществляется с помощью специального кабеля типа шлейф, которым оборудован микроконтроллерный блок. Подобное соединение также предусмотрено в крышке установки по исследованию газовых гидратов. Таким образом необходимо поместить линейку в реактор, соединить ее с одним концом кабеля, который проходит через крышку закрывающую реактор, а второй конец кабеля, проходящий через крышку соединить со шлейфом, предусмотренным в микроконтроллерном блоке системы сбора данных. Важно также предусмотреть герметичность соединения внутри реактора. Достичь этого возможно, например, термопластичным клеем, который позволяет изолировать электрические соединения, при этом становится пластичным при температурах порядка 150 °С. При необходимости клей возможно без труда удалить, нагрев его до нужной температуры.

Подключение блока питания осуществляется через разъемы, аналогичным тем, что показан на рисунке 3.2. Красным цветом отмечен разъем для подключения питания +12 В, второй разъем предназначен для подключения питания -12 В.

После корректного подключения питания, преобразователя TTL-USB всех используемых датчиков следует включить питание на блоке питания. При корректном подключении питания должен постоянно светиться один из зеленых индикаторных светодиодов. Во время осуществления обмена данными между микроконтроллером и персональным компьютером второй зеленый индикаторный светодиод периодически загорается один раз в 2 секунды.

Для того, чтобы произвести подключение к системе сбора данных необходимо нажать кнопку «Подключиться» на основном экране программы-обработчика данных. После этого красный индикаторный квадрат под кнопкой «Подключится» станет зеленого цвета, а в таблицу принятых данных будут записываться значения измерений. При этом система автоматически

будет производить пересчет относительных единиц аналогово-цифрового преобразования в значения давления и температуры согласно уравнениям перевода, который можно задавать в окне «Калибровка», которое возможно вызвать из окна «Настройки». Важно отметить, что возможно задавать лишь линейный перевод, указывая коэффициенты k и b . После изменения коэффициентов необходимо нажать кнопку принять. Если изменения не были приняты, будет высвечиваться надпись «Не откалибровано», а окно ввода непринятых коэффициентов будет окрашено в красный цвет. Все принятые параметры уравнений перевода записываются в постоянную память персонального компьютера в папку «C:\AUIGG» и будут автоматически считываться и записываться в программу-обработчик данных при каждом ее запуске.

Программа-обработчик данных позволяет в реальном времени отслеживать исследуемые параметры – давление и температуру, а также состояние греющего резистивного элемента.

На основном экране программы-обработчика данных в правой части присутствуют два поля для отображения графиков измерения параметров в реально времени. Верхний график отвечает за отображения изменения давления, нижний – за изменений температур. В поле, отображающее изменение температур, возможно выводить тренды значений всех возможных задействованных в системе датчиков температур. Выбор отображаемых значений изменений температур производится отметкой в соответствующем поле возле отображения моментального значения температуры в конкретной точке. Пример выбранного параметра температуры тосола представлен на рисунке 3.8.

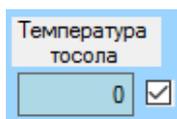


Рис. 3.8. Пример выбора температуры тосола для отображения на графике

Все принятые данные аналогово-цифрового преобразования автоматически записываются в постоянную память персонального

компьютера в папку «C:\AUIGG» в файл, содержащий дату проводимого эксперимента, а также час записи. Формат записи данных в файл представлен на рисунке 3.3.

| Время | P | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | H |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 22:54:09 | 545 | 445 | 549 | 149 | 958 | 858 | 1 |
| 22:54:10 | 546 | 446 | 550 | 150 | 959 | 859 | 1 |
| 22:54:10 | 545 | 445 | 549 | 149 | 958 | 858 | 1 |

Рис. 3.9. Формат записи в файл постоянной памяти персонального компьютера принятых системой данных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После рассмотрения возможных вариантов усовершенствования экспериментальной установки по исследованию газовых гидратов было принято решение произвести комплексную автоматизацию с возможностью автоматизированного измерения температуры и давления, а также осуществить возможность внедрения нагревательного элемента внутрь реактора, где образовывается газовый гидрат для осуществления возможности получения экспериментальных данных по измерению температурного поля в процессе роста и диссоциации газовых гидратов.

Для достижения поставленной цели были разработаны и собраны микроконтроллерный блок на базе микроконтроллера PIC16F877A, функциональные блоки для работы датчика измерения температуры на базе микросхемы TL074, функциональный блок для работы датчика измерения давления на базе микросхемы TL074, а также функциональный блок управления мощной нагрузкой на базе МДП-транзистора. Проведена калибровка и настройка измерительных устройств, а также настройка канала обмена информацией по интерфейсному кабелю с помощью преобразователя TTL-USB между микроконтроллером и персональным компьютером. Испытания показали хорошую воспроизводимость результатов и стабильность работы всей системы.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость падения напряжения на полупроводниковом датчике температуры линейна при неизменном протекающем через них токе, что согласуется с теорией p-n-переходов в полупроводниках;
2. Шаг измерения температуры разработанного измерителя с полупроводниковым диодом 1N4148W составляет 0.111 °C;
3. Предварительная оцененная относительная погрешность измерения давления не превышает 1%;

4. Микроконтроллеры PIC16F877A успешно справляются с задачей автоматизации небольших системы, как, например, установка по исследованию газовых гидратов;

5. С помощью микроконтроллера PIC16F877A возможно создавать не только автономные системы, но системы с обменом информацией по интерфейсному каналу связи, что расширяет области применения;

6. Разработанные функциональные блоки позволяют расширить возможности микроконтроллеров, позволяя системе становиться более универсальной и вариативной;

7. С помощью функциональных блоков измерения температуры возможно производить тонкую калибровку, задавая необходимый шаг измерения при наличии необходимых эталонных термометров.

Таким образом, разработанная и протестированная система автоматизированного управления установкой по исследованию газовых гидратов позволит не только производить измерение температуры тосола, но также позволит проводить эксперименты по получению температурного поля в процессе роста и диссоциации газовых гидратов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Федосеев С.М. Природные газовые гидраты. Перспективы изучения и использования/ С.М.Федосеев // Наука и техника в Якутии.- 2010.- №1(18).- С. 14-19.
2. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974. – 285 с.
3. Сухоносенко А. Л. Термогидродинамическое моделирование процессов разработки газогидратных месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Л. Сухоносенко; ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина». – М., 2013. – 158 с.
4. Дядин Ю.А., Гуцин А.Л. Газовые гидраты. // Соросовский образовательный журнал, №3, 1998, с. 55–64.
5. Макогон Ю. Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы. // Российский химический журнал, т. 48, №3, 2003, с.70-79.
6. Макогон Ю.Ф. Природные газогидраты: открытие и перспективы // Газовая промышленность. 2001. №5. С.10-16.
7. Федосеев С.М., Ларионов В.Р. Исследование гидратообразования в пористой среде // Газовые гидраты, 2006, с. 28-31.
8. Чувилин Е.М., Козлова Е.В. Исследования формирования мерзлых гидратосодержащих пород // Криосфера Земли, т. 9, №1, . 2009, с. 73-80.
9. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М.: Недра, 1980, с. 296.
10. Документация микроконтроллеров семейства Pic16F87х. [Электронный ресурс]: URL: www.microchip.ru/files/d-sheets-rus/pic16f87x.pdf
11. Хоровиц П., Хилл У. / Искусство схемотехники. // М: Мир, 2009. 704 с.
12. Полупроводниковые датчики температуры [Электронный ресурс]: URL: <http://mcu.ru/index.php/pdevices/datchiki/108poluprovodnikovye..>

13. Термодатчики на диодах в схемах на микроконтроллере. [Электронный ресурс]: URL: <http://nauchebe.net/2011/02/termodatchiki-na-diiodax%C2%A0-v-sхемах-na-mk/>

14. Датчики температуры. [Электронный ресурс]: URL: http://elektromehanika.org/publ/stati_po_ehlektronike/datchiki_temperatury_4_chasti/4-1-0-127

15. Техническое описание TL071, TL071A, TL071B, TL072, TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B [Электронный ресурс]: – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl074.pdf>

16. Документация интегрального линейного стабилизатора напряжения 7805. [Электронный ресурс]: URL: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7810.pdf>

17. Хелибайк Ч. / Программирование PIC-микроконтроллеров на PicBasic. // М: Додэка XXI. 2007. 336 с.

18. Биллиг В. А. / Основы объектного программирования на C# (C# 3.0, Visual Studio 2008) // М: Бином. Лаборатория знаний. 2010. - 584 с.

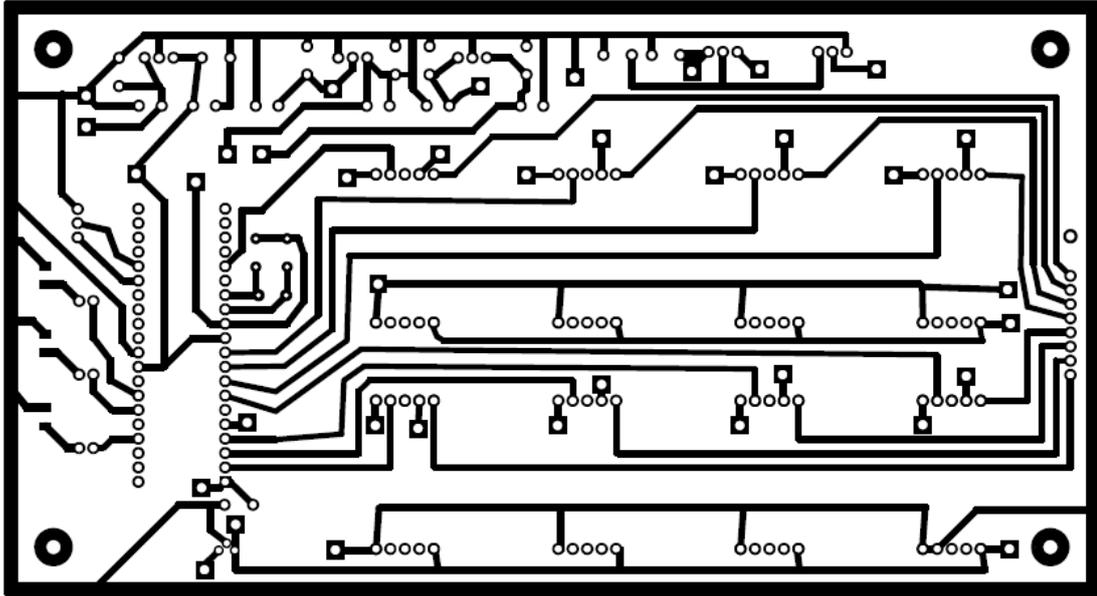


Рисунок А.1. Схема печатной платы универсального микроконтроллерного блока.

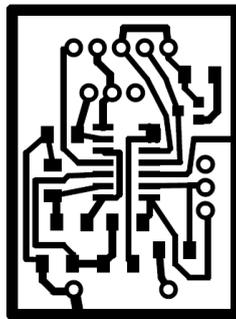


Рисунок А.2. Схема печатной платы функционального блока для датчика температуры.

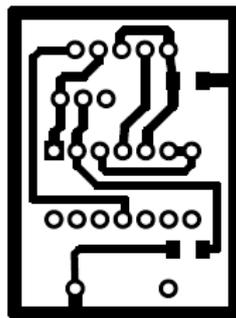


Рисунок А.3. Схема печатной платы функционального блока для датчика давления.

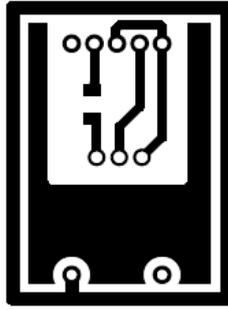


Рисунок А.4. Схема печатной платы функционального блока управления мощной нагрузкой.

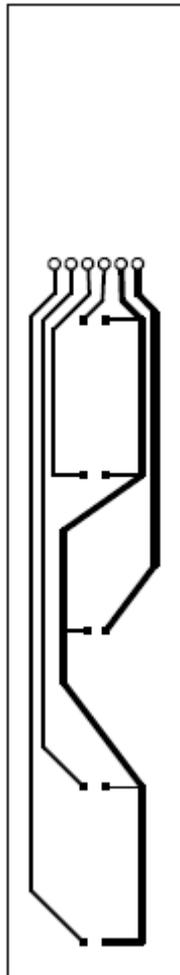


Рисунок А.5. Схема печатной платы линейки с полупроводниковыми датчиками температуры и греющим резистором.

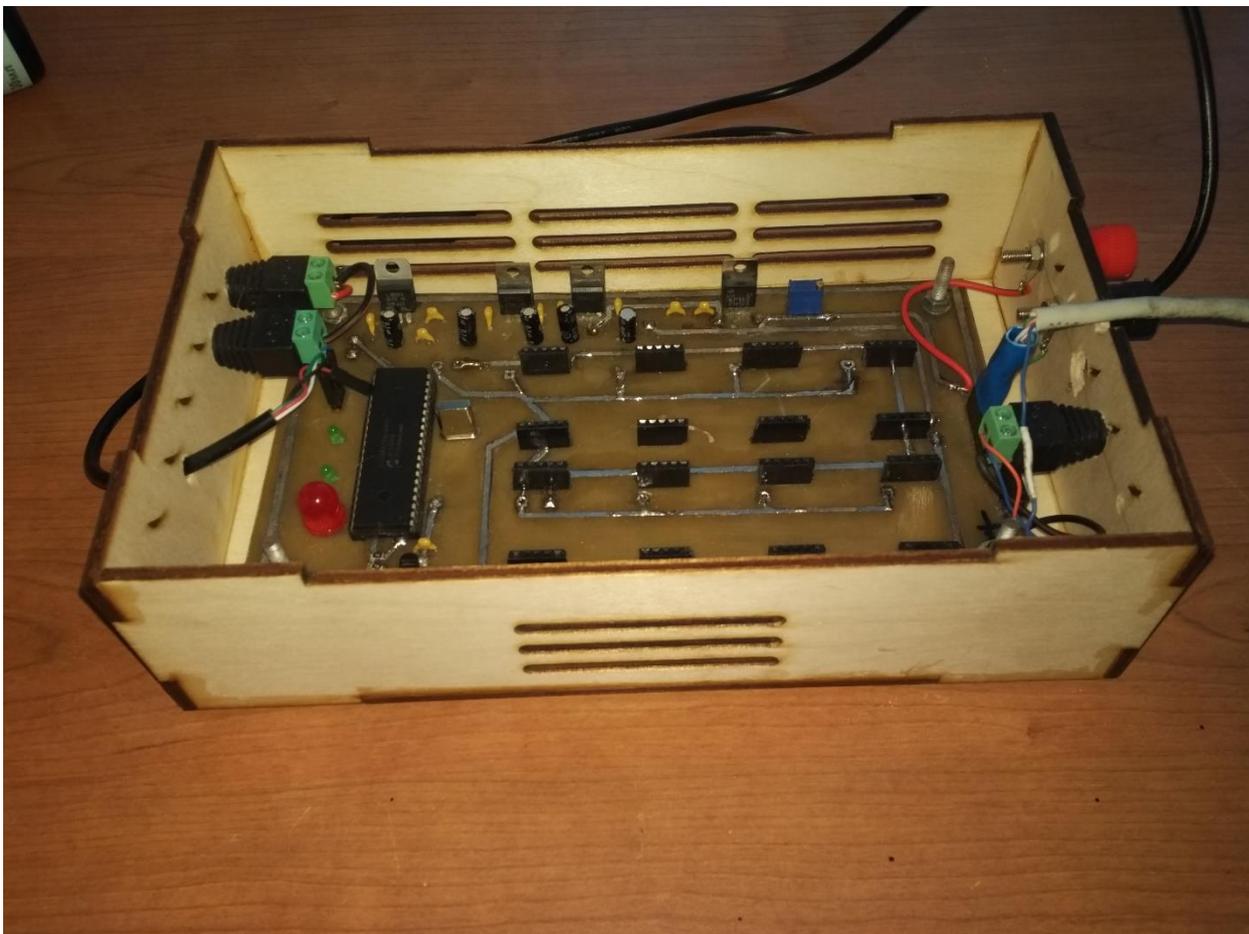


Рисунок Б.1. Реальные фото готового микроконтроллерного блока.



Рисунок Б.5. Реальные фото готовой автоматизированной системы сбора данных с установленными функциональными блоками: 5 функциональных блоков датчиков температуры, функциональный блок датчика давления и функциональный блок управления нагрузкой