



**МЧС РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства  
Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий»

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
для обучающихся по специальности  
40.05.03 Судебная экспертиза**

Екатеринбург

2020

**Пожарная безопасность технологических процессов** [Текст] : методические указания для выполнения лабораторных работ. Специальность 40.05.03 – Судебная экспертиза / П.И. Зыков, Т.В. Штеба.– Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2020. – 29 с.

*Авторы-составители:*

Штеба Т.В.,                    доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств (в составе УНК ОПБОиНП) Уральского института ГПС МЧС России.

Зыков П.И.,                старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств (в составе УНК ОПБОиНП) Уральского института ГПС МЧС России;

*Рецензент:*

Акулов А.Ю.,            начальник адъюнктуры Уральского института ГПС МЧС России, кандидат технических наук

Методические указания разработаны с целью закрепления и углубления теоретического материала. Лабораторные работы носят учебно-исследовательский характер, прививают обучающимся навыки научного эксперимента, формируют практические компетенции, содержат основные теоретические положения, задание и порядок выполнения работы, а также необходимые исходные данные.

Методические указания предназначены для обучающихся по специальности 40.05.03 Судебная экспертиза (специализация инженерно-технические экспертизы).

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	5
1. Лабораторная работа: «Исследование взрывоопасности паровоздушной смеси в технологическом аппарате с ЛВЖ» .....	6
2. Лабораторная работа: «Исследование опасности повышения давления в аппарате с жидкостью при воздействии на него внешнего источника тепла».....	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	29

## **ВВЕДЕНИЕ**

Активное строительство производственных объектов различных форм собственности с внедрением новых технологий, процессов и аппаратов требует современного и качественного подхода к оценке их пожарной опасности. Качественный подход включает в себя, прежде всего, наличие у специалиста необходимых знаний для проведения детального анализа пожарной опасности технологических процессов, по результатам чего разрабатываются системы предотвращения пожаров и противопожарной защиты, организационно-технические мероприятия, направленные на обеспечение пожарной безопасности технологии современных производств.

В настоящих методических указаниях представлены лабораторные работы, позволяющие на практике закрепить теоретические знания.

В совокупности, проводимые по дисциплине лабораторные работы, способствуют более полному усвоению и закреплению изучаемого материала, необходимого для получения специальных знаний.

Кроме того, в процессе проведения лабораторных работ вырабатываются навыки наблюдения, сопоставления, формируются общеобразовательные и профессиональные компетенции, способности решать сложные практические задачи.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Отчет по лабораторным работам может быть оформлен на листах формата А4 или в специально подготовленных тетрадях (не менее 36 листов) в клеточку.

Отчет по лабораторным работам составляется каждым обучающимся.

Общие требования к составлению отчета по лабораторным работам:

- соблюдение установленной кафедрой структуры отчета;
- логическая последовательность в изложении материала;
- грамотное и аккуратное оформление отчета.

Структура отчета по лабораторным работам:

- цель и задачи лабораторной работы;
- программа лабораторной работы;
- теоретические положения;
- схема лабораторной установки с указанием технической характеристики и принципа работы;
- методика исследований, измерений;
- журнал испытаний;
- обработка результатов;
- результаты исследований;
- анализ результатов и выводов по работе.

Структура отчетов может корректироваться в связи со спецификой лабораторных работ.

Результаты исследований в основном представляются в виде графиков.

К построению графиков предъявляются следующие требования:

- наличие заголовка названия графика, например *«График зависимости давления паров жидкости в экспериментальном сосуде от температуры окружающей среды:  $P=f(T)$ »*;
- наличие заголовков оси категорий (х) и оси значений (у) с указанием единиц измерения.

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1: «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ АППАРАТЕ С ЛВЖ»**

## **Цель работы**

Закрепление теоретических знаний при решении практических задач, связанных с оценкой пожарной опасности технологических систем, освоение методов экспериментальных исследований, привитие навыков самостоятельного анализа и обобщения данных, опыта работы с лабораторным оборудованием, аппаратурой, приборами.

## **Общие положения**

При оценке пожарной опасности технологической системы необходимо определить экспериментальным путем массу испарившейся ЛВЖ которая зависит от интенсивности процесса испарения. Только при отсутствии экспериментальных данных интенсивность испарения допускается определять по справочным материалам.

Этот параметр пожарной опасности используют для расчета:

- размеров зоны взрывоопасных концентраций паров при испарении ЛВЖ с поверхности разлива;
- опасных факторов пожара при сгорании паровоздушных смесей в открытом пространстве;
- критериев категорирования помещений и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности и классов взрывоопасных зон.

В ряде нормативных документов приводятся эмпирические выражения, позволяющие оценить интенсивность испарения горючей жидкости в зависимости от ее некоторых физико-химических свойств и температуры, скорости и температуры движущегося вдоль поверхности испарения воздушного потока. Однако эти выражения не в полной мере отражают физическую сущность происходящих диффузионных процессов, а результаты расчетов значительно (зачастую на порядок) отличаются от экспериментальных данных.

При образовании взрывоопасных концентраций внутри аппаратов с ЛВЖ и последующем выходе паров в производственное помещение, при наличии возможного источника инициирования горения, возможно воспламенение парогазового облака. Последствиями таких пожаров является разрушение технологического оборудования, выход большого количества

пожароопасных веществ наружу, в результате создается угроза жизни и здоровью обслуживающего персонала.

В качестве примера на рисунке 1.1 показаны последствия воспламенения паров ЛВЖ вышедших из технологического оборудования в цехе по приготовлению винилацетатного клея.



Рисунок 1.1. Последствия воспламенения паров ЛВЖ при пожаре в цехе по приготовлению винилацетатного клея

В настоящей работе отрабатывается метод экспериментального определения массы испарившейся ЛВЖ с поверхности разлива в неподвижную среду [1].

### Задание

1. Записать название и цель работы, а также содержание задачи, на решение которой направлено выполнение данной работы.
2. Изучить и изложить основные положения метода экспериментального определения массы паров при испарении ЛВЖ с поверхности разлива.
3. Изучить устройство лабораторной установки, зарисовать принципиальную схему установки (рис. 1.2), подготовить журнал экспериментальных данных (табл. 1.1).
4. Ознакомиться с порядком проведения экспериментального исследования, провести эксперимент (см. далее).
5. Обработать экспериментальные данные, параллельно произвести расчет количества испарившихся паров ЛВЖ по справочным данным.
6. На основании экспериментальных и расчетных данных построить графические зависимости изменения массы паров ЛВЖ от времени испарения (пример на рис. 1.6).
7. Сформулировать вывод по результатам лабораторной работы.

## Основные теоретические положения пожарной опасности паров при испарении ЛВЖ с поверхности разлива

При эксплуатации некоторых видов технологического оборудования с горючими жидкостями в производственных помещениях могут образоваться горючие паровоздушные смеси, воспламенение которых приведет к взрыву с последующим пожаром. К такому технологическому оборудованию относятся окрасочные ванны, ванны для пропитки бумаги и тканей растворами смол, ванны для промывки деталей, открытые емкости и тому подобное оборудование, т.е. аппараты с открытой поверхностью испарения находящихся в них горючих жидкостей. Аналогичные опасные ситуации возникают в помещениях при аварийных разливах горючих жидкостей.

Горючая паровоздушная смесь над поверхностью горючей жидкости образуется при выполнении условия взрывоопасности

$$\varphi_s \geq \varphi_n, \quad (1.1)$$

что с некоторым запасом надежности соответствует следующему температурному условию:

$$t_p \geq t_{всп}, \quad (1.2)$$

где  $\varphi_s$  – концентрация насыщенного пара горючей жидкости, об. доли;  
 $\varphi_n$  – нижний концентрационный предел распространения пламени, об. д.;  
 $t_p$  – рабочая температура горючей жидкости, °С;  
 $t_{всп}$  – температура вспышки горючей жидкости в открытом тигле, °С.

При выполнении указанных условий над поверхностью горючей жидкости образуются пары, способные вспыхивать от источника зажигания.

Количество образующихся паров и, следовательно, размеры зоны взрывоопасных концентраций (зоны ВОК) зависят от целого ряда факторов: физико-химических свойств горючей жидкости, ее рабочей температуры, площади и времени испарения, подвижности окружающего воздуха и пр.

Исследования проводятся по методу экспериментального определения массы паров при испарении ЛВЖ с поверхности разлива в неподвижную среду. Этот метод основан на решении уравнения нестационарной диффузии при испарении ЛВЖ с поверхности разлива в неподвижную среду.

Уравнение, описывающее массу испарившейся ЛВЖ, имеет вид:

$$m_n = \frac{\varphi_s \rho_n F_p}{3} \sqrt{\frac{12 D_t \tau}{1 - \varphi_s}}, \quad (1.3)$$



где  $\varphi_s$  – концентрация насыщенных паров, об. доли;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $D_t$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $F_p$  – площадь разлива ЛВЖ,  $\text{м}^2$ .

Определение  $\varphi_s$ ,  $\rho_{\text{п}}$  и  $D_t$  для многокомпонентных жидкостей с неизвестными теплофизическими свойствами связано с определенными трудностями. Эти величины можно рассматривать как константы для определенных условий изучения процесса испарения ЛВЖ. В таких допущениях уравнение (1.3) можно представить в следующем виде:

$$m_{\text{п}} = K F_p \sqrt{\tau}, \quad (1.4)$$

где коэффициент  $K$ :

$$K = \frac{\varphi_s \rho_{\text{п}}}{3} \sqrt{\frac{12 D_t}{1 - \varphi_s}} \quad \text{кг} \cdot \text{с}^{-0,5}. \quad (1.5)$$

Таким образом, экспериментальное исследование для определения массы паров при испарении ЛВЖ с неизвестными теплофизическими свойствами с поверхности разлива направлено к определению коэффициента  $K$ .

$$K = \frac{m_{\text{п}}}{F_p \cdot \sqrt{\tau}}. \quad (1.6)$$

Многочисленными экспериментальными исследованиями по изучению процессов испарения с поверхности разлива ЛВЖ, проведенными в Академии ГПС МЧС России, установлено, что при площади разлива более  $0,5 \text{ м}^2$  процессами диффузии по горизонтали можно пренебречь. В таком случае можно исследовать процесс испарения в виде условно вырезанного горизонтально цилиндра на поверхности разлива ЛВЖ.

При испарении ЛВЖ в дегазированную изотермическую камеру создается избыточное давление паров, которое несложно измерить манометром. Поэтому в основу экспериментального метода определения массы испарившейся ЛВЖ положено уравнение газового состояния:

$$P_{\text{п}} V_{\text{к}} = m_{\text{п}} \frac{R}{M} T_{\text{р}}, \quad (1.7)$$

где  $P_{\text{п}}$  – избыточное давление паров в камере, создаваемое испаряющейся ЛВЖ, Па;  $V_{\text{к}}$  – объем камеры, в которой происходит процесс испарения, м<sup>3</sup>;  $m_{\text{п}}$  – масса испарившейся ЛВЖ (паров), кг;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_{\text{р}}$  – рабочая температура, К;  $M$  – молярная масса, кг·кмоль<sup>-1</sup>.

Избыточное давление паров, создаваемое испаряющейся ЛВЖ, можно определить при помощи U-образного водяного манометра.

Решение уравнения (1.7) относительно значения  $m_{\text{п}}$  позволяет получить расчетную формулу для экспериментального определения массы испарившейся ЛВЖ:

$$m_{\text{п}} = 1,18 \cdot 10^{-3} M V_{\text{к}} h / T_{\text{р}}, \quad (1.8)$$

где  $h$  – показания U-образного водяного манометра, мм вод. ст.

### Лабораторная установка

Лабораторная установка (рис. 1.2) позволяет определить изменение давления в испарительной камере с ЛВЖ при заданной температуре с течением времени.

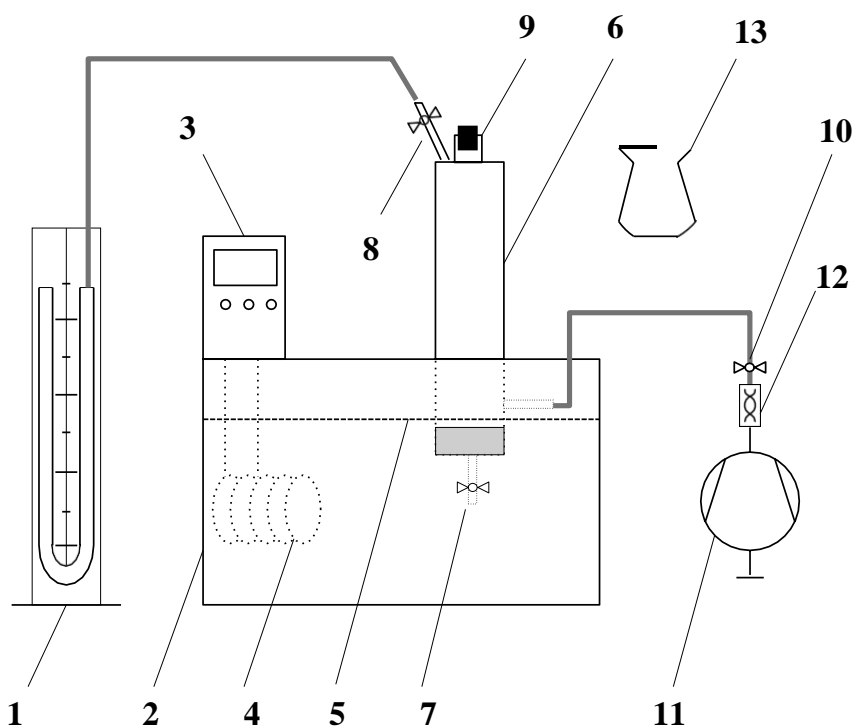


Рисунок 1.2 - Схема лабораторной установки:

1 – U-образный манометр; 2 – термостат; 3 – блок управления термостатом; 4 – нагревательный элемент термостата; 5 – уровень жидкости в термостате; 6 – испарительная камера объемом  $37,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> (поверхность испарения  $11,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>); 7, 8, 10 – краны; 9 – заливное отверстие с заглушкой; 11 – микрокомпрессор; 12 – регулятор расхода; 13 – емкость с экспериментальной жидкостью.

Установка состоит из камеры 6 объемом  $37,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , где происходит испарение исследуемой ЛВЖ с поверхности, равной  $11,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ . Давление паров испаряющейся ЛВЖ фиксируют по U-образному водяному манометру 1. Термостат 2 предназначен для предварительного нагрева исследуемой ЛВЖ и обеспечивает изотермический режим проведения опытов благодаря нагреву 4 воды 5 до необходимой для эксперимента температуры с помощью устройства 3. Микрокомпрессор 11 служит для продувки испарительной камеры от паров ЛВЖ после окончания опытов.

Внешний вид лабораторной установки перед проведением эксперимента представлен на рис. 1.3.



Рисунок 1.3. Внешний вид лабораторной установки

После того как в испарительную камеру налили исследуемую жидкость, проверяется герметичность всех соединений. Далее камера помещается в термостат (рис. 1.4).



Рисунок 1.4. Лабораторная установка во время проведения эксперимента

После каждой серии экспериментов производится продувка внутреннего объема испарительной камеры (рис. 1.5).



Рисунок 1.5. Продувка внутреннего объема испарительной камеры при помощи микрокомпрессора

## Журнал экспериментальных данных Ж У Р Н А Л

результатов определения массы паров при  
испарении ЛВЖ \_\_\_\_\_ в неподвижную среду  
(наименование или состав раствора ЛВЖ)

Рабочая температура ЛВЖ,  $t_p =$  \_\_\_\_\_ °С.

Атмосферное давление,  $P_{\text{атм}} =$  \_\_\_\_\_ кПа.

Объем испарительной камеры,  $V_k = 37,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ .

Поверхность испарения ЛВЖ,  $F_p = 11,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ .

Универсальная газовая постоянная;  $R = 8,31434 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ .

Молярная масса,  $M =$  \_\_\_\_\_  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$  (принять по значению наиболее летучего компонента, входящего в состав ЛВЖ).

Таблица 1.1

Результаты измерений и расчетов

Время измерения, мин	Показания U-образного манометра, мм вод. ст.	Масса испарившейся ЛВЖ, кг (эксперимент)	Масса испарившейся ЛВЖ, кг (расчет)	Значение К
1				
2				
...				
n				

По решению преподавателя может быть изменено:

- наименование или состав раствора ЛВЖ;
- рабочая температура ЛВЖ.

### Порядок проведения экспериментального исследования и обработки результатов

1. Ознакомиться с техникой безопасности (в том числе безопасности) при работе в лаборатории и на лабораторной установке. Расписаться в соответствующих журналах.

2. Преподаватель делит группу на 2 подгруппы, выдаёт образцы исследуемых жидкостей и определяет рабочие температуры для проведения экспериментов.

3. Совместно с преподавателем или лаборантом произвести визуальный осмотр лабораторной установки и убедиться в исправности прибора. Преподаватель назначает ответственных за контроль и снятие показаний с приборов из числа обучающихся.

4. Совместно с преподавателем или лаборантом произвести включение и настройку лабораторной установки в соответствии с условиями эксперимента (задать рабочую температуру на блоке управления термостатом, залить

исследуемую жидкость в испарительную камеру, выставить отсечку U-образного водяного манометра на показание «0»).

5. После нагрева воды в термостате до нужной температуры поместить внутрь испарительную камеру (рис. 1.4).

6. При помощи секундомера произвести снятие показаний U-образного манометра (количество измерений 10 с интервалом 1 мин).

7. По заданию преподавателя, если эксперимент проводится в несколько серий или с разными жидкостями, произвести очистку внутреннего объема испарительной камеры, а также её продувку с помощью микрокомпрессора.

8. Обработка опытных данных:

- по формуле (1.8) определить массу паров испарившейся ЛВЖ;
- значение коэффициента  $K$  рассчитать по формуле (1.6) для каждого показания U-образного водяного манометра.;
- определить среднее значение коэффициента  $K_{cp}$ ;
- написать уравнение для расчета удельной массы испарения исследуемой ЛВЖ с поверхности разлива в неподвижную среду,  $\text{кг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ :

$$m_{\pi}^* = K_{cp} \sqrt{\tau},$$

где  $K_{cp}$  – экспериментально установленное среднее значение.

Данное уравнение справедливо при температуре испарения, равной  $^{\circ}\text{C}$  для \_\_\_\_\_ (привести название исследуемой ЛВЖ и имеющиеся на неё паспортные данные).

9. По окончании проведенных расчетов обменяться данными получившейся массы испарившихся паров исследуемой жидкости между подгруппами.

10. Заполнить журнал экспериментальных данных.

11. Пользуясь результатами исследования двух подгрупп, построить графики изменения массы паров ЛВЖ в течение времени эксперимента при заданных температурах (см. рис. 1.6). На основании полученных зависимостей сформулировать вывод о пожарной опасности исследуемой ЛВЖ.

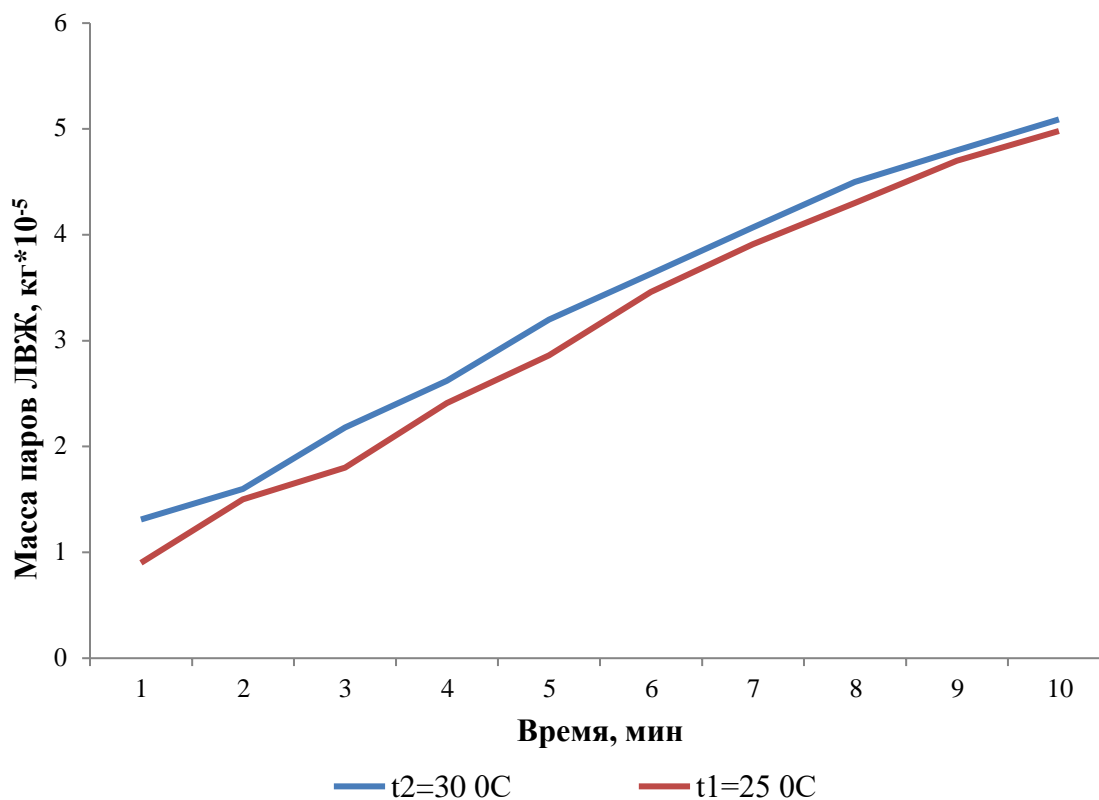


Рисунок 1.6. Пример изменения массы паров ЛВЖ в течение времени

### **Охрана труда и пожарная безопасность**

1. Работу проводить при условии исправной системы электроснабжения, заземления.
2. Проявлять осторожность при работе с элементами лабораторного оборудования, изготовленными из каленого стекла.
3. Не оставлять без присмотра подключенный к электросети термостат.
4. При появлении запаха жженой изоляции отключить установку от сети.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2: «ИССЛЕДОВАНИЕ ОПАСНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В АППАРАТЕ С ЖИДКОСТЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕГО ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛА»**

### **Цель работы**

Закрепление теоретических знаний при решении практических задач, связанных с оценкой пожарной опасности технологических систем, освоение методов экспериментальных исследований, привитие навыков самостоятельного анализа и обобщения данных, опыта работы с лабораторным оборудованием, компьютерами, аппаратурой, приборами.

### **Общие положения**

При оценке пожарной опасности технологической системы необходимо проанализировать причины её разгерметизации, приводящей к аварийному выходу пожароопасных веществ наружу.

Причины эти по своей природе могут быть самыми разнообразными. Наиболее опасная причина – нагревание герметичных аппаратов и трубопроводов с жидкостями выше установленного предела, когда в них создается повышенное давление, которое способно вызвать разгерметизацию технологической системы.

В практике пожарного часто встречаются случаи, когда на объекте тушения в условиях неконтролируемого горения (пожара) происходит взрыв оборудования с агрессивной средой, что в конечном итоге приводит к плачевным обстоятельствам, часто связанным с гибелью людей. В качестве примера на рисунке 2.1 показаны последствия взрыва технологического оборудования при пожаре на АЗС.



Рисунок 2.1. Последствия взрыва оборудования при пожаре на АЗС



В настоящей работе отрабатывается метод экспериментального исследования опасности повышения давления в герметичных аппаратах с жидкостью при воздействии на них внешних источников тепла, а также эффективности принятых мер безопасности.

### **Задание**

1. Указать название и цель работы, ознакомиться с общими положениями.
2. Изучить и изложить основные теоретические положения пожарной опасности при повышении давления в аппарате и меры безопасности.
3. Изучить устройство лабораторной установки, зарисовать принципиальную схему установки (рис. 2.2), подготовить журнал экспериментальных данных (табл. 2.2).
4. Ознакомиться с порядком проведения экспериментального исследования, провести эксперимент (см. далее).
5. Произвести компьютерную обработку полученных в эксперименте термограмм при помощи программного комплекса *FLIR QuickReport 1.2 SP2* (пример на рис. 2.8), заполнить журнал экспериментальных данных.
6. На основании экспериментальных данных построить графические зависимости изменения давления от температуры (пример на рис. 2.9-2.10).
7. Определить эффективность принятых мер безопасности (степень заполнения резервуара, окраска поверхности аппарата теплоотражающими составами или соблюдение противопожарных разрывов).
8. Сформулировать вывод по результатам лабораторной работы.

### **Основные теоретические положения пожарной опасности при повышении давления в аппарате и меры безопасности**

Большую пожарную опасность при изменении температуры окружающей среды представляют герметичные аппараты. Повышение давления в герметичных аппаратах, полностью заполненных пожароопасной жидкостью или сжиженным газом, является сложным процессом, так как сопровождается одновременно не только увеличением объема жидкости, но и приращением вместимости самого аппарата в результате упругого и термического расширения его стенок. При этом объем жидкости изменяется в большей степени по сравнению с увеличением размеров самого аппарата. Поэтому нагревание технологической системы, полностью заполненной жидкостью или сжиженными газами, даже в пределах суточных колебаний

температуры окружающего воздуха может создать давление, которое приведет к разгерметизации системы.

Давление, создаваемое жидкостью в полностью заполненном аппарате  $P_k$  при тепловом воздействии на систему, определяют по формуле

$$P_k = P_n + \Delta P, \quad (2.1)$$

где  $P_n$  – начальное давление жидкости в аппарате, МПа;  $\Delta P$  – приращение давления, МПа.

Приращение давления в герметичном нагреваемом аппарате, полностью заполненном жидкостью (без учета изменения размеров аппарата), можно определить по формуле

$$\Delta P = \frac{\beta_p}{\beta_{сж}} \Delta T, \quad (2.2)$$

где  $\beta_p$  – коэффициент объемного расширения жидкости,  $K^{-1}$ ;  $\beta_{сж}$  – коэффициент объемного сжатия жидкости,  $MPa^{-1}$ ;  $\Delta T$  – изменение температуры, К.

Коэффициент объемного расширения зависит от температуры жидкости. При отсутствии справочных данных о значении коэффициента объемного расширения жидкости или сжиженного газа его можно определить из соотношения изменения плотности при повышении температуры

$$\beta_p = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 \Delta T}, \quad (2.3)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность жидкости до и после нагрева соответственно.

Значение этого коэффициента для воды описывается зависимостью

$$\beta_p = \left[ 4,5 + 1,1 \left( \frac{T_n + T_k}{2} - 283 \right)^{0,975} \right] 10^{-5}, \quad (2.4)$$

где  $T_n$ ,  $T_k$  – начальная и конечная температуры жидкости в интервале нагрева соответственно, К.

В широких интервалах температуры и давления коэффициент объемного сжатия для воды сохраняет почти постоянное значение и может быть принят равным  $4,97 \cdot 10^{-4}$ ,  $MPa^{-1}$ .

В случае если  $P_k$  превысит допустимое давление среды в аппарате, которое определяется исходя из прочностных характеристик конструкционного материала, то велика вероятность разгерметизации аппарата, которая в итоге может привести к взрыву или пожару.

Если аппарат заполнен не на 100 %, т.е. над жидкостью имеется паровое пространство, то давление в аппарате определяется величиной упругости насыщенных паров  $P_s$  при данной температуре. Чем выше температура жидкости в аппарате, тем больше  $P_s$  [1].

Изменение давления насыщенных паров жидкостей в зависимости от температуры можно найти в справочных пособиях. При отсутствии справочных данных давление насыщенного пара определяют по формуле

$$\lg P_s = A_A - \frac{C_A}{t_p} \quad (2.5)$$

где  $P_s$  — давление насыщенного пара при температуре  $t_p$ ;  $A_A$ ,  $B_A$  и  $C_A$  — константы уравнения Антуана;  $t_p$  — рабочая температура, °С.

Давление паров нефтепродуктов можно определить по формуле

В.П. Сучкова

$$P_s = \frac{\exp\left[6,908 + 0,0443 \frac{t}{t_{всп}} - 0,924 \frac{t}{t_{всп}} + 2,055\right]}{1047 + 7,48 t_{всп}}, \quad (2.6)$$

где  $t_{всп}$  — температура вспышки, °С.

В случае если давление насыщенного пара будет превышать допустимое давление  $P_{дон}$  в аппарате по прочностным характеристикам, то возможна его разгерметизация. Условие разгерметизации аппарата с наличием паровоздушного пространства можно записать в следующем виде

$$P_s \geq P_{дон} / K_{\delta}, \quad (2.7)$$

где  $K_{\delta}$  — коэффициент безопасности, принимаемый  $> 1$ .

Защита аппаратов от повышения давления при увеличении температуры достигается множеством способов.

Заполнение аппаратов хранимой средой осуществляется не на 100 %, т.е. создается *свободное парогазовое пространство*. Свободное пространство

выполняет функцию компенсатора при тепловом расширении жидкости. Максимально допустимую степень заполнения  $\varepsilon$  емкостей и резервуаров можно определить по формуле

$$\varepsilon = 1 - \beta_p \Delta T_{\max}, \quad (2.8)$$

где  $\Delta T_{\max}$  – максимально возможная амплитуда колебаний температуры жидкости в сосуде, К.

При этом минимальный размер пространства, свободного от жидкости  $V_{\text{св}}$ , должен составлять

$$V_{\text{св}} = V_{\text{ап}} (1 - \varepsilon), \quad (2.9)$$

где  $V_{\text{ап}}$  – объем аппарата, м<sup>3</sup>.

Для контроля рабочей температуры аппараты оборудуются контрольно-измерительными приборами или автоматически действующими регуляторами температуры. Защита аппаратов, емкостей от облучения внешними источниками тепла осуществляется теплоизоляцией, экранированием, орошением, окрашиванием поверхности специальными красками. Влияние окраски на температуру нагрева жидкости в аппарате при неизменной интенсивности внешнего теплового потока представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Влияние окраски на температуру нагрева жидкости в резервуаре

Цвет окраски	Температура , °С
Алюминиевая окраска	11,5
Белая	12,5
Светло-кремовая	13,0
Розовая	13,3
Голубая	13,6
Серая	14,6
Зеленая	14,7
Суриковая	16,6
Берлинская лазурь	20,3
Зеленая (хромовая)	22,0
Черная	30,0

Баллоны и другие емкости с горючими газами и жидкостями нельзя размещать ближе 1 - 2 м от приборов отопления и других источников тепла, необходимо соблюдать *противопожарные разрывы*.

Наиболее общим методом определения противопожарных разрывов является метод учета минимальной допустимой интенсивности облучения ( $q_{\min}$ ), под которой понимается плотность падающего теплового потока ( $q_{\text{пад}}$ ), превышение значения которой может вызвать воспламенение смежных объектов за определенный промежуток времени (обычно за время,

необходимое для введения сил и средств на тушение пожара). Достаточность величины противопожарного разрыва устанавливается сравнением падающего теплового потока при данных условиях пожара с минимальной допустимой интенсивностью облучения аппарата.

Условия безопасности представляются соотношением:

$$q_{\text{пад}} \leq q_{\text{мин}}. \quad (2.10)$$

Представленные выше мероприятия могут применяться как в отдельности, так и в совокупности.

### Лабораторная установка

Лабораторная установка (рис. 2.2) моделирует воздействие солнечной радиации и тепла окружающей среды при колебаниях суточной температуры окружающего воздуха, а также воздействие теплового излучения от пожара.

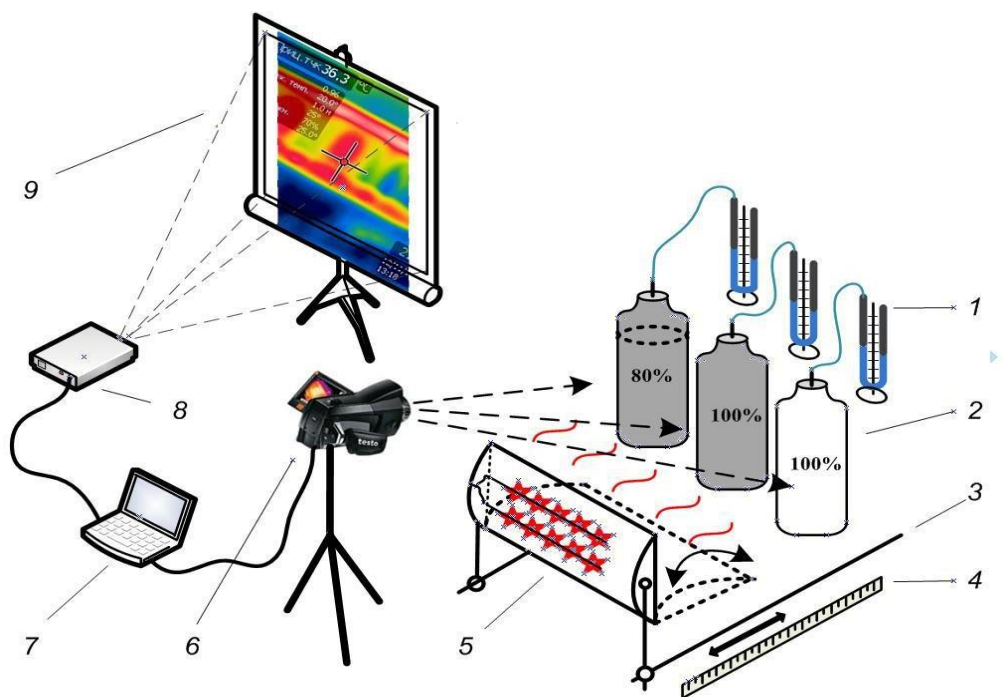


Рисунок 2.2. Схема лабораторной установки:

1 – U-образный жидкостный манометр; 2 – металлические баллоны с разной окраской и степенью заполнения; 3 – направляющая инфракрасного излучателя; 4 – линейка для измерения расстояния от излучателя до баллонов; 5 – инфракрасный излучатель; 6 – тепловизор; 7 – ноутбук; 8 – проектор; 9 – экран для проектора

Внешний вид разработанного лабораторного стенда показан на рис. 2.3.



Рисунок 2.3. Внешний вид лабораторной установки

В установке для оценки эффективности способов защиты аппаратов от нагрева, помимо неполного заполнения (80 %) экспериментального сосуда жидкостью, предусмотрено:

1) окраска экспериментального сосуда (заполненного на 100 %) теплоотражающим составом (на схеме показан белым цветом). Остальные сосуды окрашены в черный цвет;

2) направляющая 3 подвижного радиационного нагревателя 5 и средство измерения расстояния 4 предназначены для имитации противопожарных разрывов от источника нагрева до объекта защиты (экспериментальных сосудов 2).

Радиационный нагреватель установлен на выдвижные направляющие, что позволяет изменять расстояние между поверхностью баллонов и нагревательным элементом в диапазоне от 10 до 50 см. Замеры расстояния выполняются с помощью линейки, закрепленной вдоль направляющих (рис. 2.4).

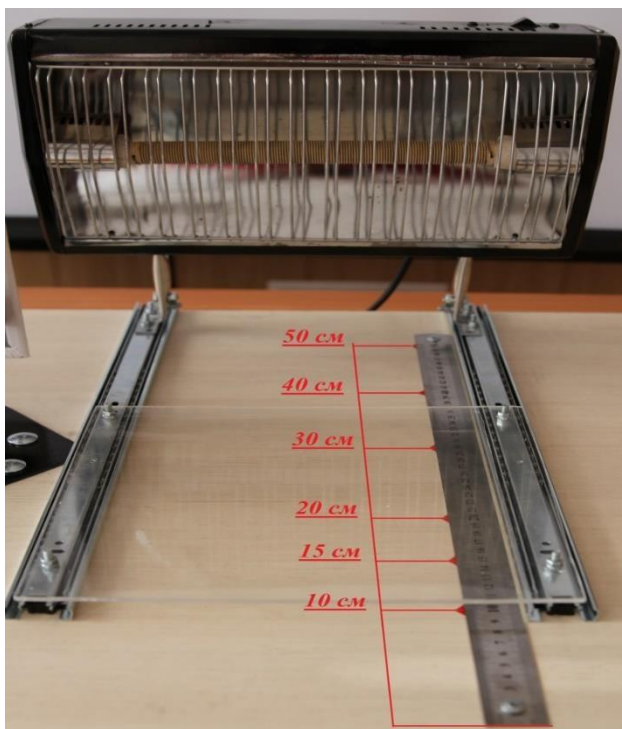


Рисунок 2.4. Элемент лабораторной установки, позволяющий имитировать противопожарный разрыв

дующей поверхности [6]. Распределение температуры отображается на дисплее (или в памяти) тепловизора как цветное поле, где определённой температуре соответствует определённый цвет.

Внешний вид и принцип работы тепловизора представлен на рис. 2.5.

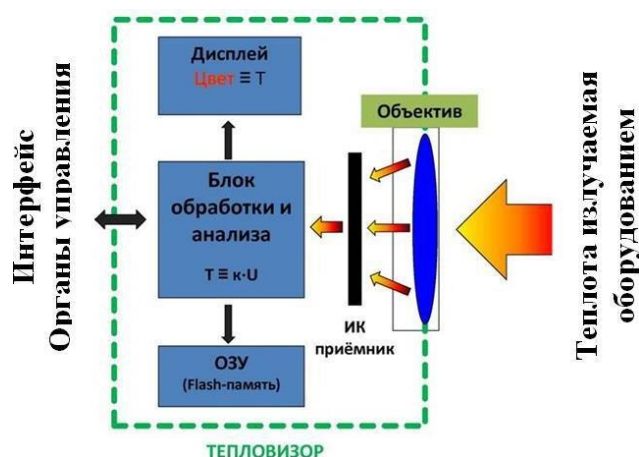


Рисунок 2.5. Внешний вид и принцип работы тепловизора FLIR T335

Экспериментальные сосуды 2 прикреплены к поворачивающемуся на  $180^\circ$  упору, имеющему два рабочих положения (рис. 2.6). Положение №1 обеспечивает нагрев поверхности баллонов, а также контроль давления посредством U-образных манометров 1. Положение №2 позволяет



регистрировать изменение температуры поверхности баллонов с течением времени с помощью тепловизора б.



Рисунок 2.6. Рабочие положения экспериментальных сосудов

### Журнал экспериментальных данных

Пример журнала записи экспериментальных данных представлен в виде таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Время, мин	Вид экспериментального сосуда																	
	Заполненный на 80 % (цвет черный)						Заполненный на 100 % (цвет черный)						Заполненный на 100 % (цвет хрома)					
	Давление, мм вод.ст.			*Т, °C			Давление, мм вод.ст.			*Т, °C			Давление, мм вод.ст.			*Т, °C		
	Расстояние между баллонами и источником теплового излучения, см																	
	40 см	30 см	...l см	40 см	30 см	...l см	40 см	30 см	...l см	40 см	30 см	...l см	40 см	30 см	...l см	40 см	30 см	...l см
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1																		
2																		
3																		
...n																		

Примечание: \* – графы «Температура» заполняются после обработки термограмм.

По решению преподавателя может быть изменено:

- время проведения эксперимента и интервал снятия показаний;
- величина и количество экспериментальных расстояний между нагревателем и экспериментальными сосудами.

## Порядок проведения экспериментального исследования и обработки результатов

1. Ознакомиться с техникой безопасности и пожарной безопасностью при работе в лаборатории и на лабораторной установке. Расписаться в соответствующих журналах.

2. Совместно с преподавателем или лаборантом произвести визуальный осмотр лабораторной установки на предмет отсутствия неисправностей. Преподаватель назначает ответственных за контроль и снятие показаний с приборов из числа обучающихся.

3. Совместно с преподавателем или лаборантом произвести включение и настройку лабораторной установки в соответствии с условиями эксперимента (фокус тепловизора, показания манометров «0», расстояние до нагревателя (по заданию)).

4. Не позже 20 с после включения нагревателя начать эксперимент с отчетом времени.

5. По достижении контрольного времени (0,5 мин; 1 мин или др.) в соответствующих графах журнала экспериментальных данных производится запись показаний манометров и поворачивается упор крепления экспериментальных сосудов в положение № 2 на  $180^0$  (см. рис. 2.6).

6. После перевода экспериментальных сосудов в положение №2 ответственный за работу с тепловизором производит снимок.



Рисунок 2.7 - Пример ошибочных измерений тепловизором

Если не привести упор крепления сосудов в положение №2, то в объектив тепловизора кроме баллонов будут попадать высоконагретые элементы излучателя, что в итоге приведет к высоким погрешностям измерения температуры поверхности баллонов (рис. 2.7).

7. После окончания серии эксперимента обучающимися производится обработка термограмм, сохраненных на карте памяти тепловизора. Для этого предназначены: экран, проектор и персональный компьютер с программным

обеспечением «FLIR QuickReport 1.2». Обработка термограмм необходима для получения средней температуры поверхности каждого из баллонов (рис. 2.8). Полученные значения средней температуры записываются в соответствующие графы журнала экспериментальных данных.

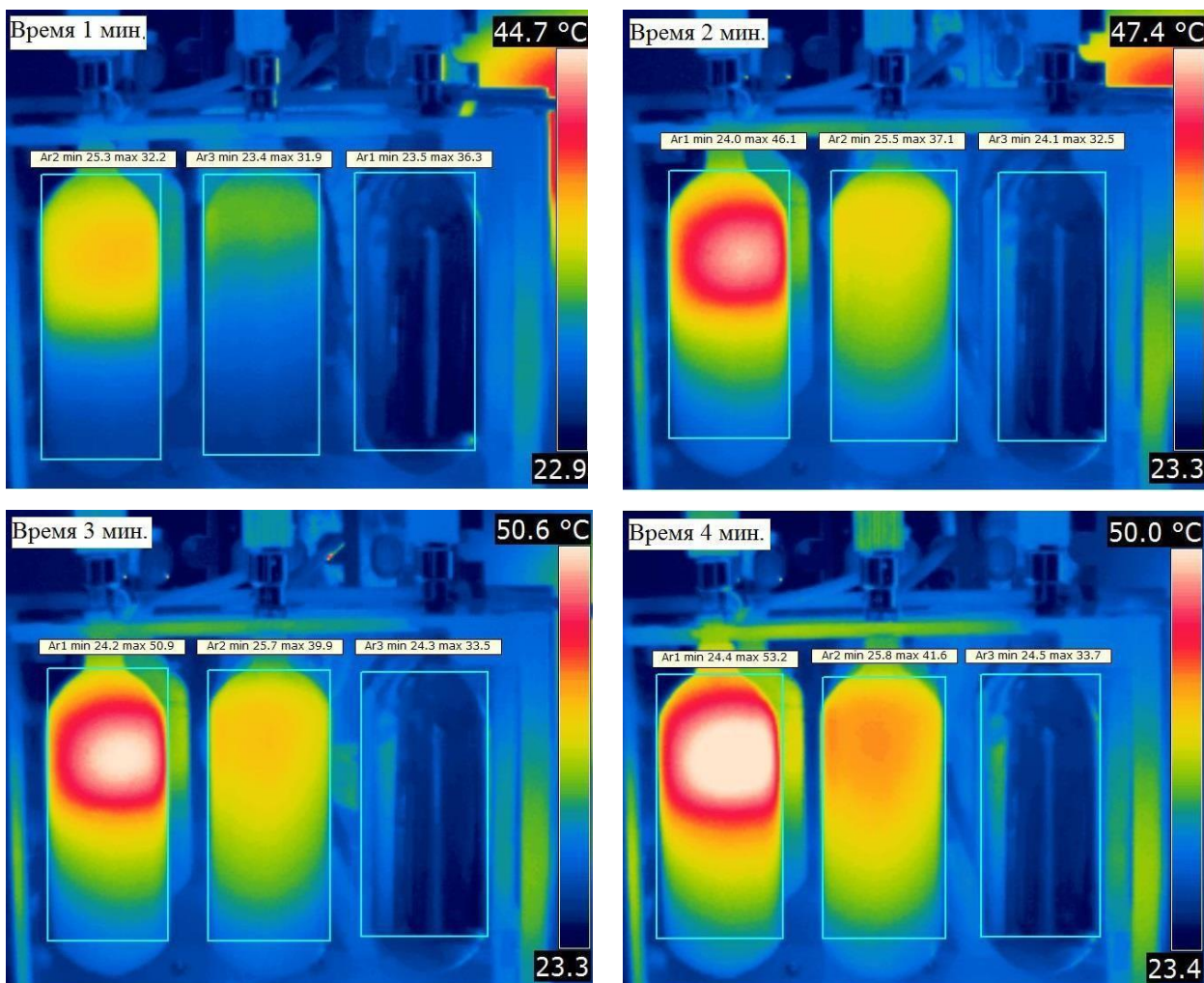


Рисунок 2.8. Пример термограмм нагрева сосудов в течение 4-х минут (очередность расположения сосудов соответствуют схеме рис. 1.2)

8. После проведения первой серии эксперимента аналогичным образом (п. 3 - 7) проводятся последующие (изменяется только расстояние от нагревателя до экспериментальных сосудов).

9. По окончании экспериментального исследования и заполнения журнала экспериментальных данных производят построение графических зависимостей  $t = f(\tau)$  (см. рис. 2.9) и  $P_k = f(t)$  (см. рис. 2.10).

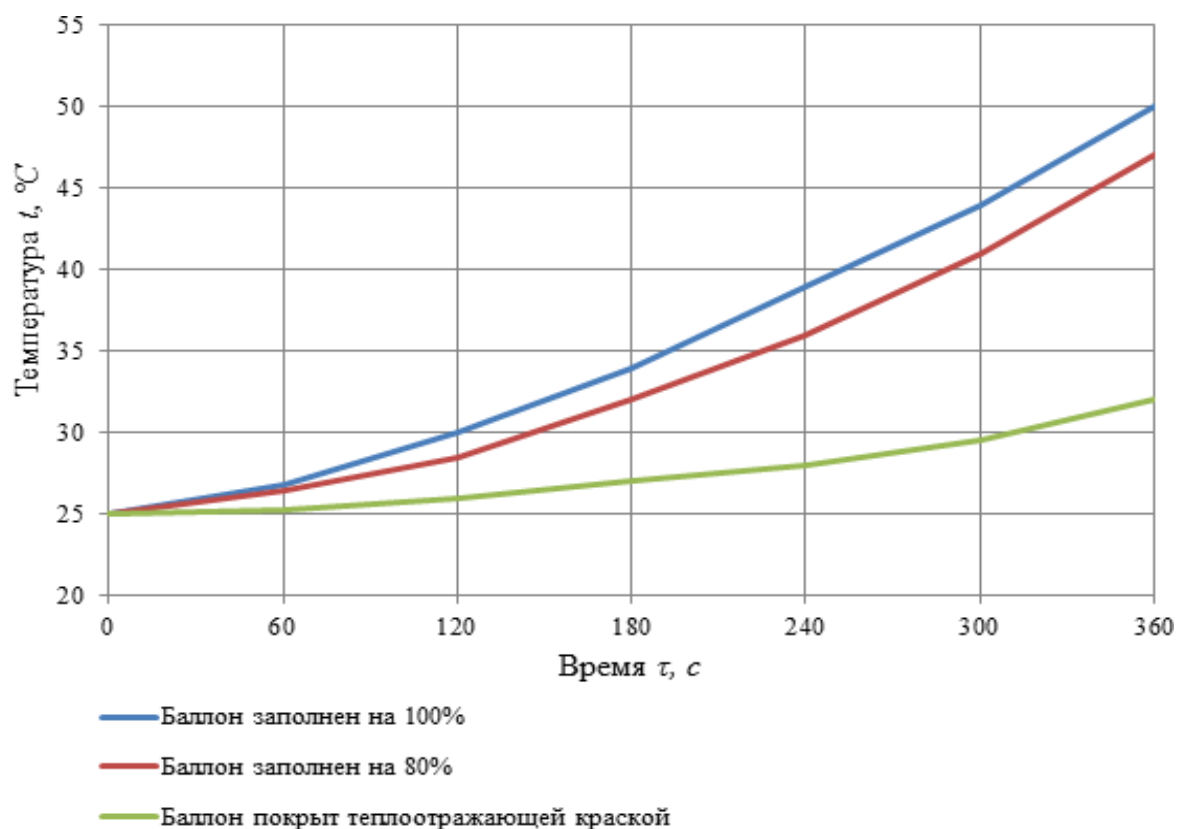


Рисунок 2.9. Пример изменения температуры нагреваемого аппарата с течением времени.  
Расстояние до излучателя (30 см)

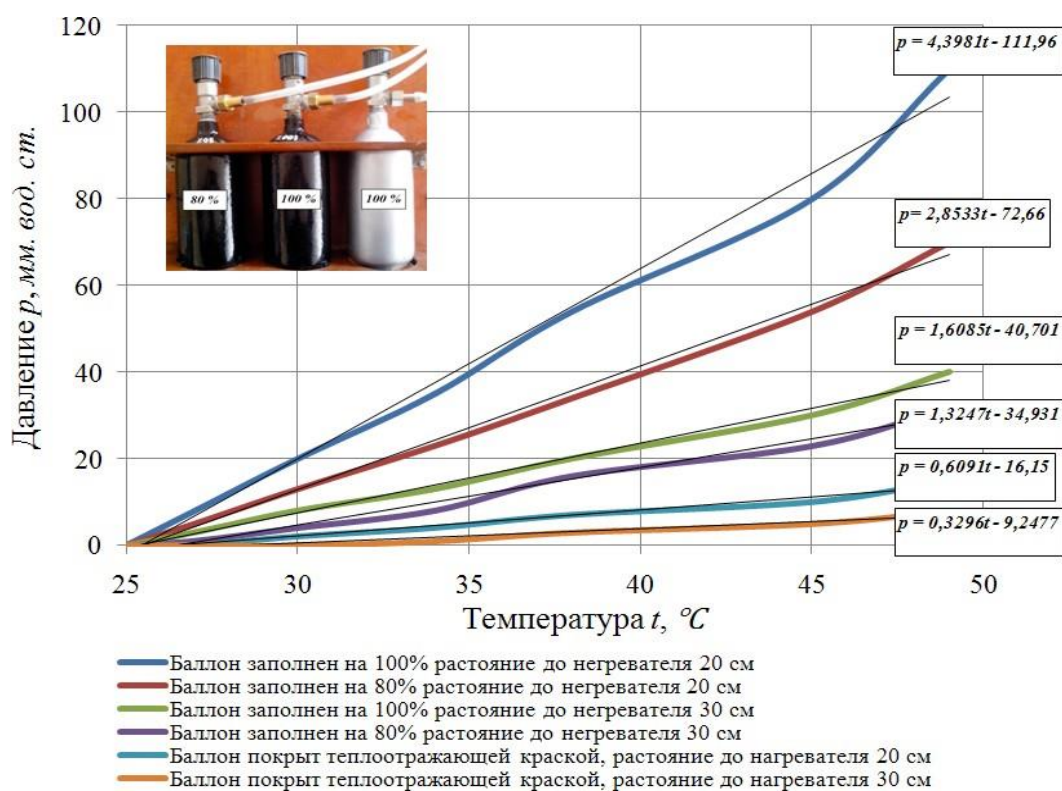


Рисунок 2.10. Пример зависимости давления в нагреваемом аппарате от температуры окружающей среды.

10. (Вариативная часть). По указанию преподавателя полученные экспериментальные данные могут быть сопоставлены с расчетными, для

этого необходимо воспользоваться формулами (2.1) – (2.6). Также, пользуясь программным обеспечением *EXCEL*, можно получить функции, такие как представленные в подписях к линиям тренда (см. рис. 2.10), с целью составления прогноза для иных значений давления и температуры.

11. По результатам лабораторной работы формулируется вывод.

### **Охрана труда и пожарная безопасность**

1. Работу проводить при условии исправной системы электроснабжения, заземления.
2. Не прикасаться к высоконагретым элементам инфракрасного нагревателя.
3. Не оставлять без присмотра подключенный к электросети нагреватель.
4. При появлении запаха жженой изоляции отключить установку от сети.
5. Максимальная температура нагрева жидкости в сосудах не должна превышать 50 °С.
6. Проявлять осторожность при работе на лабораторной установке, имеющей большую массу и съемные элементы конструкции.

## **СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Алексеев М. В. Основы пожарной профилактики в технологических процессах производств / М. В. Алексеев. – М.: ВИПТШ – 1972. – 330 с.
2. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник в двух томах; под ред. А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко – М.: Химия, 1990.
3. ГОСТ Р 12.3.047-2012. «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля». - М.: 2012. — 84 с.
4. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
5. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
6. ССБТ. Оборудование производственное. Технические требования безопасности (ГОСТ 12.2.003-91).- М.: Госстандарт России, 1991.