

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ  
ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ  
СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

ФГБОУ ВО СИБИРСКАЯ ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ  
ГПС МЧС РОССИИ



И.Н. Пожаркова, Е.Ю. Трояк, А.В. Антонов

## **ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

### **ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебное пособие

**Железногорск  
2022**

УДК 614.832+614.838+614.841  
ББК 38.96  
П46

**Авторы:** Пожаркова Ирина Николаевна, кандидат технических наук, доцент  
Трояк Евгений Юрьевич, кандидат педагогических наук  
Антонов Александр Викторович, кандидат технических наук

**Рецензенты:**

Назаров Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов  
(в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты)  
(ФГБОУ ВО Академия ГПС МЧС России)

Штеба Татьяна Валерьевна, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств  
(ФГБОУ ВО Уральский институт ГПС МЧС России)

Пожаркова, И. Н. Пожарная безопасность технологических процессов. Лабораторный практикум [Текст]: учебное пособие / И. Н. Пожаркова, Е. Ю. Трояк, А. В. Антонов. – Железногорск : ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022. – 114 с. : ил.

Учебное пособие предназначено для использования в образовательном процессе при изучении дисциплины «Пожарная безопасность технологических процессов», предусмотренной учебными планами подготовки обучающихся по специальностям 20.05.01 Пожарная безопасность, 40.05.03 Судебная экспертиза, направлению 20.03.01 Техносферная безопасность.

Учебное пособие разработано в соответствии с утвержденными рабочими программами дисциплины «Пожарная безопасность технологических процессов» ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России по указанным специальностям (направлениям) подготовки. Предназначено для использования на лабораторных занятиях, а также углубления обучающимися теоретических знаний по разделам дисциплины в рамках самостоятельной работы.

УДК 614.832+614.838+614.841  
ББК 38.96

<https://sibpsa.ru/pozhar-bezop/>  
ISBN 978-5-906874-97-9

© ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2022  
© Пожаркова И.Н., Трояк Е.Ю., Антонов А.В., 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ИНСТРУКТАЖ ПО ОХРАНЕ ТРУДА И ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ.....	8
1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ.....	11
1.1. Исследование изменения давления паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в закрытом аппарате .....	13
1.1.1. Краткие теоретические сведения .....	14
1.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	18
1.1.3. Лабораторная установка.....	19
1.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы .....	22
1.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе .....	24
1.1.6. Контрольные вопросы .....	24
1.2. Исследование пожарной опасности повышения давления в нагреваемом аппарате, заполненном горючей жидкостью.....	26
1.2.1. Краткие теоретические сведения .....	27
1.2.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	29
1.2.3. Лабораторная установка.....	29
1.2.4. Порядок выполнения лабораторной работы .....	32
1.2.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе .....	35
1.2.6. Контрольные вопросы .....	35
2. ИСТОЧНИКИ ЗАЖИГАНИЯ.....	37
2.1. Исследование узла трения как источника зажигания .....	38
2.1.1. Краткие теоретические сведения .....	38
2.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	41

2.1.3. Лабораторная установка.....	42
2.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	44
2.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе.....	47
2.1.6. Контрольные вопросы.....	47
2.2. Исследование электрических искр как источника зажигания.....	49
2.2.1. Краткие теоретические сведения.....	49
2.2.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	52
2.2.3. Лабораторная установка.....	53
2.2.4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	56
2.2.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе.....	58
2.2.6. Контрольные вопросы.....	59
3. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА.....	60
3.1. Исследование противопожарных мембран.....	61
3.1.1. Краткие теоретические сведения.....	62
3.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	65
3.1.3. Лабораторная установка.....	66
3.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	70
3.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе.....	72
3.1.6. Контрольные вопросы.....	73
4. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	74
4.1. Исследование пожарной опасности теплообменных процессов.....	74
4.1.1. Краткие теоретические сведения.....	75
4.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	80
4.1.3. Лабораторная установка.....	80
4.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	83
4.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе.....	86

4.1.6. Контрольные вопросы .....	86
4.2. Исследование пожарной опасности типовых способов сушки сыпучих материалов .....	87
4.2.1. Краткие теоретические сведения .....	88
4.2.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы.....	89
4.2.3. Лабораторная установка.....	90
4.2.4. Порядок выполнения лабораторной работы .....	93
4.2.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе .....	96
4.2.6. Контрольные вопросы .....	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	101
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	104
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	106
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж .....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ И.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ К .....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Л .....	112

## **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время обеспечение безаварийной работы промышленных предприятий невозможно без учета пожарной и взрывопожарной опасности технологических процессов. Знание основ безопасности технологических процессов базируется не только на нормативных документах, но и на понимании физической сущности явлений, происходящих при функционировании оборудования пожаро- взрывоопасных производств.

Рабочие учебные планы ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России по программам специалитета 20.05.01 Пожарная безопасность, 40.05.03 Судебная экспертиза и бакалавриата 20.03.01 Техносферная безопасность предусматривают практическое освоение обучающимися в рамках лабораторных занятий по дисциплине «Пожарная безопасность технологических процессов», с одной стороны, методик экспериментальных исследований процессов, связанных с трением, образованием искр, теплообменом, сушкой, обращением горючих и легковоспламеняющихся жидкостей, которые возникают при эксплуатации технологических аппаратов, с другой стороны – изучение инженерно-технических мероприятий по обеспечению противопожарной защиты типовых технологических процессов.

Актуальным является создание учебной литературы, отражающей факторы риска и способы обеспечения безопасности современных производств, с учетом свойств применяемых в технологических процессах веществ и материалов, а также позволяющей, в соответствии с утвержденными рабочими программами дисциплины, обеспечить закрепление обучающимися теоретических положений изучаемых тем, формирование навыков работы с лабораторным оборудованием и контрольно-измерительной аппаратурой, самостоятельного анализа и обобщения данных, составления высококачественных инженерно-технических отчетов.

Учебное пособие «Пожарная безопасность технологических процессов. Лабораторный практикум» включает в себя, помимо теоретического материала, детальное описание методик выполнения лабораторных работ с использованием оборудования ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, в том числе установок и стендов, разработанных научно-педагогическим составом кафедры инженерно-технических экспертиз и криминалистики. Кроме того, отдельные разделы пособия дополнены видеоматериалами, иллюстрирующими последовательность выполнения натуральных экспериментов.

Каждый раздел учебного пособия содержит краткие теоретические сведения, описание лабораторной установки и используемого оборудования, руководство по выполнению лабораторной работы, задание на лабораторную работу по теме раздела и цель ее выполнения, журнал проведения испытаний, требования к оформлению отчета, контрольные вопросы по разделу, необходимые таблицы справочных и исходных данных.

# ИНСТРУКТАЖ ПО ОХРАНЕ ТРУДА И ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ

## 1. Общие положения.

1.1. Лица, работающие в лаборатории, обязаны знать пожарную опасность применяемых химических веществ и материалов и соблюдать меры пожарной безопасности при работе с ними.

1.2. Все работы в лаборатории, связанные с возможностью выделения токсичных и пожаровзрывоопасных паров и газов, должны проводиться только в вытяжных шкафах. Вытяжные шкафы надлежит поддерживать в исправном состоянии. Пользоваться вытяжными шкафами с разбитыми стеклами или неисправной вентиляцией запрещено.

1.3. Запрещается уходить с рабочего места и оставлять без присмотра зажженные горелки и другие нагревательные приборы.

1.4. Приточно-вытяжная вентиляция во всех помещениях лаборатории включается за 30 минут до начала работы и выключается по окончании рабочего дня.

1.5. В лабораторных помещениях или в коридорах рядом со входом должны находиться первичные средства пожаротушения. Каждый работник должен знать место их нахождения и уметь ими пользоваться.

## 1.6. В помещениях лаборатории запрещается:

- загромождать и захламлять проходы, а также подходы к средствам пожаротушения;
- мыть полы и столы керосином, бензином и другими органическими растворителями;
- сушить какие-либо предметы на отопительных приборах;
- убирать случайно пролитые огнеопасные жидкости при включенных электронагревательных приборах;
- оставлять на рабочем месте промасленные тряпки и бумагу;

- хранить в рабочих помещениях какие-либо вещества неизвестного происхождения;
- курить на рабочем месте.

1.7. В процессе работы необходимо содержать рабочее место в порядке.

1.8. При работе в лаборатории должен использоваться хлопчатобумажный халат.

1.9. Лаборатория должна быть укомплектована медицинской аптечкой с набором необходимых медикаментов и перевязочных средств.

1.10. Перед началом проведения инструктажа обучаемым выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

1.11. Лица, допустившие невыполнение или нарушение инструкции по охране труда, привлекаются к дисциплинарной ответственности в соответствии с правилами внутреннего трудового распорядка и, при необходимости, подвергаются внеочередной проверке знаний норм и правил охраны труда.

2. Требования охраны труда перед началом работы.

2.1. Включить освещение помещения и убедиться в исправной работе светильников.

2.2. Подготовить к работе необходимый инструмент и оборудование.

2.3. При использовании в работе электрических приборов и аппаратов необходимо убедиться в их исправности и целостности подводящих кабелей и электровилок.

3. Требования охраны труда во время работы.

3.1. Запрещается проводить работы, не связанные с заданием или не предусмотренные рабочими инструкциями.

3.2. Необходимо поддерживать установленный режим освещенности и вентиляции.

3.3. При работе с электроприборами необходимо соблюдать меры безопасности от поражения электрическим током.

3.4. После завершения работы электрооборудование необходимо обесточить.

3.5. При получении травмы обучаемый должен доложить об этом преподавателю.

4. Требования охраны труда в аварийных ситуациях.

4.1. В случае появления неисправности при работе с электроприборами немедленно отключить его электросети и сообщить об этом руководству.

4.2. Категорически запрещено выполнять или продолжать работу на неисправном оборудовании (при появлении искрения, специфического запаха нагретой изоляции и т.д.).

4.3. При возникновении пожара следует немедленно вызвать пожарную охрану, приступить к гашению огня имеющимися средствами пожаротушения и поставить в известность дежурного по Академии и начальника кафедры.

4.4. При получении травмы немедленно обратиться за медицинской помощью и сообщить об этом руководству.

5. Требования охраны труда по окончании работы.

5.1. Привести в порядок рабочее место.

5.2. Проветрить помещение, закрыть окна, фрамуги, выключить свет.

5.3. Отключить от электросети электрические приборы.

## **1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ**

Пожарная опасность жидкостей оценивается по температуре вспышки, температуре воспламенения, температуре самовоспламенения, концентрационным и температурным пределам распространения пламени, а также другим параметрам [9].

Температура вспышки – самая низкая температура горючего вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще не достаточна для возникновения устойчивого горения.

Температура воспламенения – самая низкая температура горючего вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары или газы с такой скоростью, что после их зажигания возникает устойчивое пламенное горение.

Температура самовоспламенения – самая низкая температура горючего вещества, при которой в условиях специальных испытаний происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением.

Нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени (НКПР и ВКПР) – минимальное и максимальное содержание горючего в смеси, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания.

Температурные пределы распространения пламени – температуры вещества, при которых его насыщенные пары образуют в конкретной окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени.

Горючая жидкость (ГЖ) – жидкость, способная самостоятельно гореть после удаления источника зажигания и имеющая температуру вспышки выше 61 °С при испытаниях в закрытом тигле.

Из горючих жидкостей выделяют группы легковоспламеняющихся и особо опасных легковоспламеняющихся жидкостей, воспламенение паров которых происходит при низких температурах, определенных нормативными документами по пожарной безопасности [1].

Легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ) – жидкость, способная самостоятельно гореть после удаления источника зажигания и имеющая температуру вспышки не выше 61 °С при испытаниях в закрытом тигле.

Особо опасная ЛВЖ – жидкость с температурой вспышки не выше 28 °С.

Эксплуатация аппаратов различного типа с горючими жидкостями сопровождается выделением наружу веществ, которые могут образовывать пожаро- и взрывоопасные зоны в производственных помещениях и на открытых площадках. Размеры образующихся зон определяются с одной стороны условиями выхода горючих веществ из технологического оборудования, с другой стороны – количеством и свойствами жидкостей и их паров.

## 1.1. Исследование изменения давления паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в закрытом аппарате

При испарении жидкости в закрытом пространстве спустя некоторое время устанавливается динамическое равновесие – состояние системы, при котором количество жидкости, которая испаряется, равняется количеству сконденсированного пара. Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью, называется насыщенным паром.

Основным показателем испаряемости ЛВЖ и ГЖ является давление насыщенных паров  $p_s$  – это давление, которое оказывают пары на стенки сосуда при испарении жидкости в замкнутом пространстве. Эта величина не может превышать определенного максимального значения, которое зависит от природы жидкости и ее температуры.

Давление насыщенных паров определяется их концентрацией и зависит от температуры жидкости. Численные значения  $p_s$  ЛВЖ и ГЖ используют при расчете количества испарившейся жидкости, определении степени пожарной опасности насыщенного пара горючей жидкости, расчете критических температур жидкости в закрытом технологическом оборудовании.

В промышленности расчет давления насыщенных паров, необходим для определения пусковых качеств топлива для двигателей внутреннего сгорания. Также данная характеристика позволяет судить о склонности нефтей и нефтепродуктов к образованию паровых пробок, например в трубопроводе, потерях при испарении и хранении в резервуарах и т.д., и является основным показателем испаряемости и стабильности нефтепродуктов [11].

В пожарно-технических расчетах величина  $p_s$  является необходимым параметром для вычисления интенсивности испарения жидкости и используется при определении массы облака горючего, испаряющегося через дыхательную систему аппарата, или образующегося в случае возникновения

аварийной ситуации. Значение давления насыщенных паров используется, в частности, при установлении категорий помещений по взрывопожарной и пожарной опасности [6], расчете величин пожарного риска [2].

**Цель лабораторной работы:** экспериментальное определение давления насыщенных паров ЛВЖ и ГЖ для оценки возможности образования взрывоопасной смеси.

### 1.1.1. Краткие теоретические сведения

Методика анализа взрывопожарной опасности технологического оборудования и процесса включает изучение возможности образования взрывоопасных концентраций (ВОК) внутри нормально работающего технологического оборудования и в открытом пространстве [4]. Для оценки возможности образования ВОК необходимо знать пожароопасные свойства веществ и материалов, обращающихся в технологическом процессе.

Общее условие образования ВОК (условие опасности) независимо от вида горючего вещества, типа производственного аппарата и места образования горючей смеси имеет вид [13]:

$$\varphi_n \leq \varphi_p \leq \varphi_v, \quad (1.1)$$

где  $\varphi_n$  и  $\varphi_v$  – соответственно нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени, об. доли;

$\varphi_p$  – рабочая (действительная) концентрация горючего вещества, об. доли.

На образование зон ВОК оказывают влияние многие факторы, характеризующие свойства жидкости и окружающей среды. При этом рабочая концентрация  $\varphi_p$  паров жидкости в паровоздушном пространстве аппарата может изменяться практически от 0 до максимального при рабочей температуре жидкости  $t_p$  значения – насыщенной концентрации  $\varphi_s$ .

Применительно к закрытым аппаратам с неподвижным уровнем жидкости этот процесс можно разделить на две стадии (рис. 1.1): на первой –

паровое облако перемещается от поверхности жидкости до крыши аппарата; на второй – происходит насыщение свободного объема аппарата до концентрации  $\varphi_s$  во всем объеме паровоздушного пространства [14, 16].

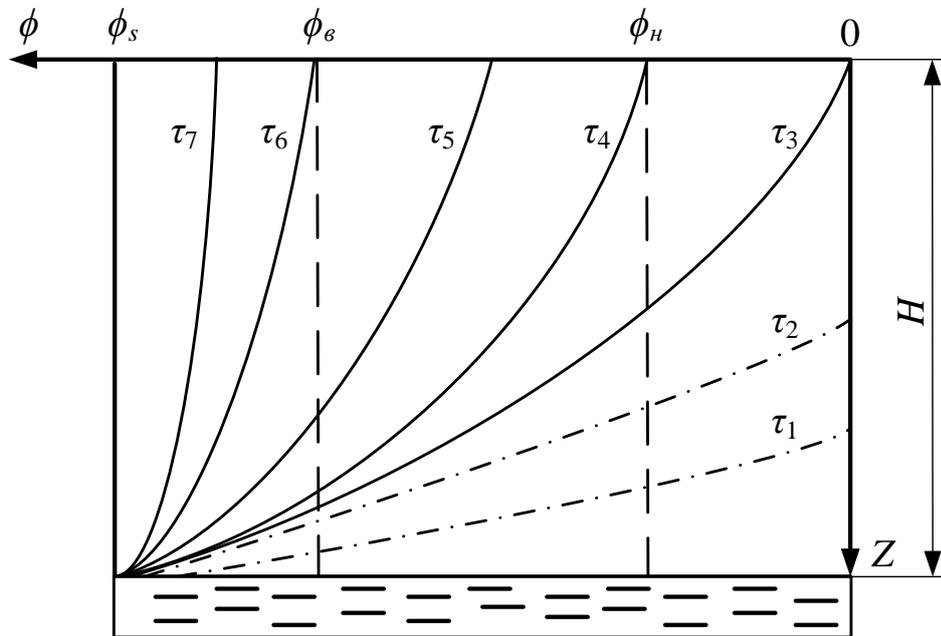


Рисунок 1.1 – Распределение концентрации  $\varphi$  паров жидкости по высоте свободного пространства на различные моменты времени  $\tau$  :

- · · · · – графики первой стадии насыщения;
- — — — — – графики второй стадии насыщения;
- жидкость

На первой стадии насыщения над поверхностью жидкости концентрация паров равна концентрации насыщения  $\varphi_s$ . Далее по высоте она уменьшается и описывается параболой  $n$ -ой степени. Продолжительность этой стадии в аппарате с вертикальными стенками для паров с плотностью выше плотности воздуха можно рассчитать по формуле:

$$\tau_1 = \frac{H^2(1-\varphi_s)}{2D_t \cdot n \cdot (n+1)}, \quad (1.2)$$

где  $\tau_1$  – время перемещения парового облака до крыши аппарата, с;

$H$  – высота паровоздушного пространства (свободного объема) аппарата, м;

$\varphi_s$  – концентрация насыщенных паров, об. доли;

$D_i$  – коэффициент диффузии паров жидкости при  $t_p$ , м<sup>2</sup>/с;

$n$  – относительный градиент концентрации на поверхности зеркала жидкости.

Установлено, что значение  $n$  при испарении горючих жидкостей в условиях молекулярной диффузии колеблется в пределах 1–2,47 и зависит от условий тепломассообмена. Для многих жидкостей  $n \approx 2$  [12].

С момента достижения паровым облаком крыши аппарата наступает вторая стадия насыщения. Над поверхностью жидкости концентрация паров распределена по параболическому закону, но в любой точке паровоздушного пространства (кроме точек у поверхности жидкости) концентрация паров возрастает во времени по экспоненциальному закону.

Распределение концентрации паров с плотностью выше плотности воздуха в свободном объеме технологических аппаратов с жидкостями на второй стадии описывается формулой:

$$\varphi_{Z,\tau} = \varphi_s \left\{ \left[ \left( \frac{Z}{H} \right)^n - 1 \right] \cdot e^{\frac{n \cdot D_i \cdot F \cdot \tau}{V \cdot H}} + 1 \right\}, \quad (1.3)$$

где  $\varphi_{Z,\tau}$  – текущая концентрация паров на расстоянии  $Z$  от крыши аппарата, об. доли;

$Z$  – расстояние от крыши аппарата до точки, где концентрация паров равна значению  $\varphi_{Z,\tau}$ , м;

$F$  – площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>;

$V$  – объем паровоздушного пространства аппарата, м<sup>3</sup>;

$\tau$  – время испарения, с.

Из соотношения (1.3) можно рассчитать время  $\tau_{on}$ , в течение которого паровоздушная среда в аппарате остается горючей, т.е. когда минимальная концентрация паров меньше  $\varphi_g$ :

$$\tau_{on} = -\frac{V \cdot H}{n \cdot D_i \cdot F} \cdot \ln \left\{ \frac{\frac{\varphi_e}{\varphi_s} - 1}{\left(\frac{Z}{H}\right)^n - 1} \right\}. \quad (1.4)$$

Формула (1.4) применима при выполнении условия  $\varphi_e \leq \varphi_s$ .

Значение концентрации  $\varphi_s$  насыщенных паров, входящей в выражения (1.3)-(1.4), определяется по формуле:

$$\varphi_s = \frac{p_s}{p_p}, \quad (1.5)$$

где  $p_p$  – рабочее давление в аппарате, кПа.

$p_s$  – давление насыщенных паров, кПа.

Давление насыщенных паров  $p_s$  может быть найдено экспериментальными методами [5], по номограммам [20] или из справочной литературы [7]. Кроме того, для индивидуальных жидкостей  $p_s$  может определяться расчетным путем по формуле Антуана [9]:

$$p_s = 10^{\left( \frac{A - \frac{B}{t_p + C_A}}{t_p + C_A} \right)}, \quad (1.6)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C_A$  – константы уравнения Антуана [9];

$t_p$  – рабочая температура жидкости, °С.

Для сложных смесей взаиморастворимых углеводородных жидкостей, таких как нефть и нефтепродукты, при расчете давления насыщенных паров более точные результаты дают эмпирические зависимости, например [13]:

$$p_s = \frac{e^{6,908 + 0,0433(t_p - 0,924 \cdot t_{ecn} + 2,055)}}{1047 + 7,48 \cdot t_{ecn}}, \quad (1.7)$$

где  $t_{ecn}$  – температура вспышки жидкости, °С.

Величины, использующиеся при расчетах согласно формулам (1.2)-(1.4): объем паровоздушного пространства аппарата  $V$ , площадь поверхности испарения горючей жидкости  $F$ , высота паровоздушного

пространства аппарата  $H$ , устанавливаются из технологического регламента или путем замера соответствующих линейных размеров.

Численное значение коэффициента диффузии  $D_t$  рассчитывается по формуле:

$$D_t = D_0 \cdot \left( \frac{273 + t_p}{273} \right)^n \cdot \frac{p_p}{p_0}, \quad (1.8)$$

где  $D_0$  – коэффициент диффузии паров жидкости в воздухе при  $0\text{ }^\circ\text{C}$  (определяется по справочным данным [9]),  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$p_0$  – нормальное атмосферное давление, кПа (атмосферное давление, равное давлению столба ртути высотой 760 мм при температуре  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Рассмотренные параметры испарения ЛВЖ и ГЖ могут быть использованы для расчета объемов взрывоопасных смесей, образующихся в аппаратах (например, в резервуарах при их первоначальном заполнении нефтепродуктами, при заполнении окрасочных ванн лакокрасочными материалами, а также при аварийных проливах жидкостей), и оценки возможных последствий при их воспламенении [10].

### **1.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с электрооборудованием.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением 220 В.

4. Все работы необходимо проводить в вытяжном шкафу при включенной вентиляции.

5. Запрещается органолептический анализ исследуемой жидкости.

6. Запрещается уходить с рабочего места и оставлять без присмотра

работающую водяную баню.

7. Запрещается выливать ЛВЖ и ГЖ в раковину.

8. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе со стеклянным оборудованием, вредными веществами и электрооборудованием.

9. При проливе небольших объемов ЛВЖ и ГЖ (до 10 мл) немедленно сообщить о случившемся преподавателю или лаборанту, промокнуть жидкость салфеткой, которую по указанию преподавателя поместить в специальную закрывающуюся емкость.

10. Участки тела, на которые попали ЛВЖ и ГЖ, немедленно промыть большим количеством воды.

11. В случае появления неисправности при работе с электроприборами немедленно отключить их от электросети и сообщить об этом преподавателю.

12. Запрещается пользоваться открытым пламенем при работе в лаборатории.

13. При получении травмы обучаемый должен доложить об этом преподавателю.

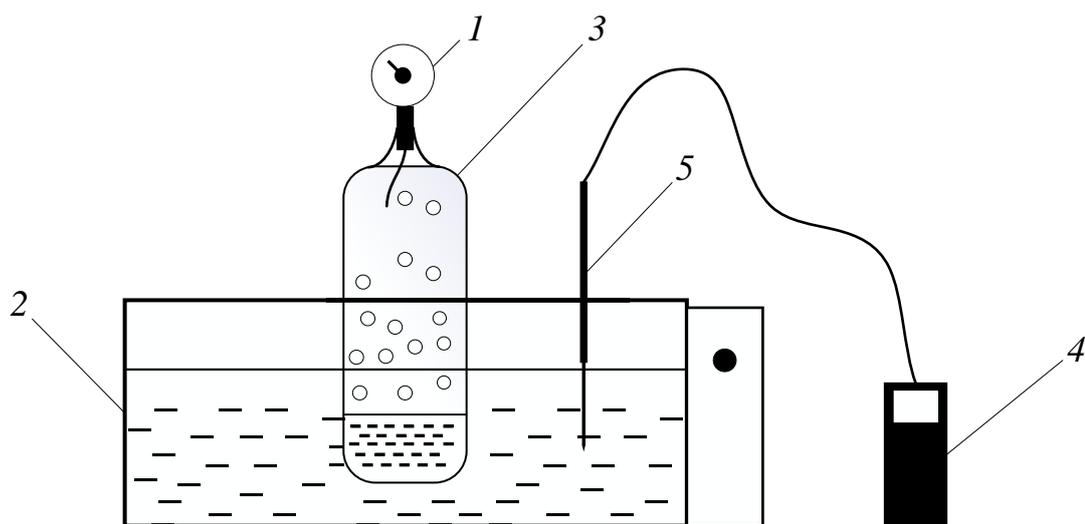
14. После завершения работы электрооборудование необходимо обесточить.

Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

### **1.1.3. Лабораторная установка**

На рис. 1.2 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования изменения давления паров ЛВЖ и ГЖ в закрытом аппарате. Лабораторная установка позволяет экспериментальным путем определить давление паров в заполненном горючей жидкостью сосуде, пропорциональное давлению насыщенных паров  $p_s$ .

Лабораторная установка состоит из сосуда 3, наполненного исследуемой жидкостью; водяной бани 2 с терморегулятором для нагревания сосуда с жидкостью; манометра 1 для измерения давления паров горючей жидкости, закрепленного на пробке для сосуда 3, электронного термометра 4 с погружной термопарой 5 для контроля рабочей температуры.



*a*



*б*

Рисунок 1.2 – Схема лабораторной установки для исследования изменения давления паров ЛВЖ и ГЖ в закрытом аппарате

*a* – принципиальная схема; *б* – общий вид:

1 – манометр; 2 – водяная баня; 3 – сосуд с исследуемой жидкостью;  
4 – электронный термометр; 5 – погружная термопара

При испарении жидкости, нагретой до рабочей температуры  $t_p$ , в сосуде создается давление паров  $p_m$ , измеряемое манометром  $I$  и связанное с определяемым в результате эксперимента давлением насыщенных паров  $p_s$  следующим соотношением:

$$p_s = 133,3(p_b - p_m), \quad (1.9)$$

где  $p_b$  – барометрическое давление, кПа.

Значение  $p_s$  позволяет вычислить концентрацию насыщенных паров  $\varphi_s$ , используя выражение (1.5), а также, на основании (1.4) и (1.8) найти время  $\tau_{on}$ , в течение которого сохраняется взрывоопасная опасная концентрация паров исследуемой жидкости.

[Видеоматериал](#), иллюстрирующий последовательность проведения натурального эксперимента с использованием лабораторной установки (рис. 1.2), доступен по ссылке, представленной в виде QR-кода.



Исходными данными для проведения эксперимента и выполнения расчетов являются:

1. Атмосферное давление:

- нормальное атмосферное давление  $p_0$ , кПа (принимается  $p_0 = 101,325$  кПа);
- рабочее давление в аппарате  $p_p$ , кПа (принимается равным барометрическому давлению  $p_p = p_b$ , определяемому измерением).

2. Характеристики исследуемой жидкости:

- наименование (задается преподавателем);
- рабочая температура  $t_p$ , °C (задается преподавателем в диапазоне 30-40 °C);
- физико-химические и пожаровзрывоопасные свойства жидкости (определяются по справочнику [9]);

- коэффициент диффузии паров жидкости при рабочей температуре  $D_i$ , м<sup>2</sup>/с (определяется по выражению (1.8));
- относительный градиент концентрации на поверхности зеркала жидкости  $n$  (принимается  $n = 2$ ).

3. Геометрические характеристики сосуда и паровоздушного пространства (рис. 1.3) (определяются измерением и расчетом).

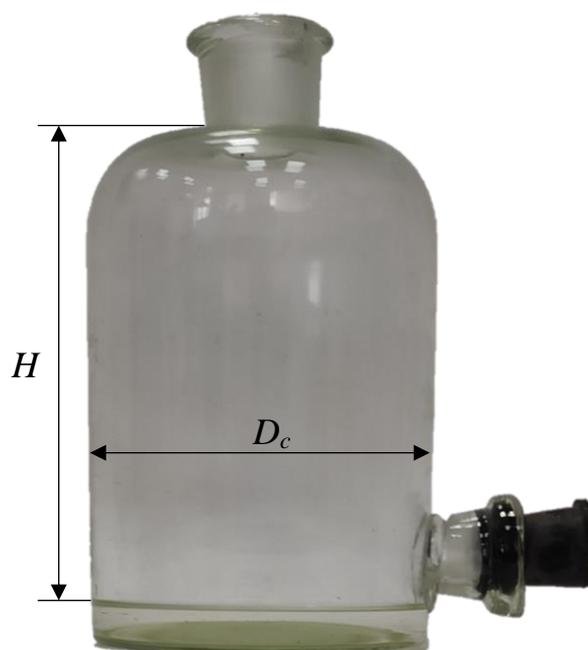


Рисунок 1.3 – Сосуд с исследуемой жидкостью

#### 1.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретические сведения.
2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
3. Разделиться на три подгруппы для проведения эксперимента.

Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.

4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента (рабочую температуру  $t_p$ ) наименование исследуемой горючей жидкости, дополнительное лабораторное оборудование (барометр, линейка).

5. В журнал проведения испытаний (приложение А) записать исходные данные, используя справочные значения [9], предварительные измерения и расчеты.

6. Провести эксперимент в следующем порядке:

6.1. Заполнить восемью литрами воды ванну водяной бани 2.

6.2. В вытяжном шкафу налить 50 мл исследуемой жидкости в сосуд 3.

6.3. Вставить манометр 1 с пробкой в горловину сосуда 3. Убедится в герметичности соединения.

6.4. Поместить сосуд 3 с исследуемой жидкостью в ванну водяной бани 2.

6.5. Подключить водяную баню 2 к электросети 220 В.

6.6. Установить рабочую температуру  $t_p$  на терморегуляторе водяной бани 2.

6.7. Поместить термопару 5, подсоединенную к электронному термометру 4, в ванну водяной бани 2.

6.8. Дождаться момента, когда показания манометра 1 будут постоянными в течение 1 мин.

6.9. На основании показаний манометра 1 зафиксировать давление паров  $p_m$  исследуемой жидкости в сосуде, занести значение в табл. 1.1.

6.10. Отключить водяную баню 2 от электросети.

6.11. Дождаться остывания сосуда и воды в водяной бане.

6.12. Не разъединяя, переместить манометр 1 и сосуд 3 в вытяжной шкаф.

6.13. Произвести отсоединение манометра 1 от сосуда 3.

6.14. Слить исследуемую жидкость из сосуда 3 в специальную емкость. Слить воду из водяной бани 2 в канализацию.

7. Используя экспериментально полученное значение  $p_m$ , исходные данные и формулы (1.4)-(1.5), (1.9), произвести расчет давления насыщенных паров  $p_s$ , концентрации насыщенных паров  $\varphi_s$ , времени  $\tau_{on}$ , в течение

которого сохраняется опасная концентрация паров исследуемой жидкости. Результаты занести в табл. 1.1.

8. Используя исходные данные и выражения (1.6)-(1.7), определить значение давления насыщенных паров  $p_s$  расчетными методами. Вычислить соответствующие значения  $\varphi_s$  и  $\tau_{on}$ . Результаты занести в табл. 1.1.

9. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 1.1 – Экспериментальные и расчетные данные

№ п/п	Данные	Давление паров $p_m$ , кПа	Давление насыщенных паров $p_s$ , кПа	Концентрация насыщенных паров $\varphi_s$		Время $\tau_{on}$ , с
				об. доля	% об.	
1.	экспериментальные					
2.	расчетные на основании (1.6)	-				
3.	расчетные на основании (1.7)	-				

### 1.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Исходные данные.
4. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных (табл. 1.1), в том числе расчетные формулы.
5. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

### 1.1.6. Контрольные вопросы

1. Объясните, при каком условии над поверхностью пролива ЛВЖ или ГЖ происходит образование зоны ВОК.

2. Назовите факторы, оказывающие влияние на образование зон ВОК.
3. Перечислите способы предотвращения образования ВОК в аппаратах с ЛВЖ и ГЖ.
4. Поясните порядок проведения эксперимента.
5. Приведите примеры расчетов, в которых используются найденные экспериментально характеристики.
6. Оцените взрывопожароопасность исследуемого процесса испарения исследуемой жидкости в зависимости от НКПР и ВКПР.
7. Дайте характеристику исследуемой жидкости (химическая формула, физико-химические и пожаровзрывоопасные свойства, средства тушения, применение в промышленности, воздействие на организм человека).

## **1.2. Исследование пожарной опасности повышения давления в нагреваемом аппарате, заполненном горючей жидкостью**

При нагревании герметичных аппаратов с горючими жидкостями, имеющими над зеркалом испарения паровоздушное пространство, происходит увеличение давления, величина которого зависит от температуры жидкости. Однако давление в таких аппаратах не может достигать больших значений, т.к. оно определяется только давлением насыщенных паров  $p_s$  при данной температуре.

Повышение давления в герметичных аппаратах, полностью заполненных пожароопасной жидкостью или сжиженным газом, при нагревании является более сложным процессом, так как сопровождается одновременно не только увеличением объема жидкости в результате ее теплового расширения, но и приращением объема самого аппарата в результате термического расширения его стенок. При этом объем жидкости изменяется в большей степени по сравнению с объемом самого аппарата. Следовательно, на стенки аппарата будет оказываться дополнительное избыточное давление жидкости, которое может вызывать не только упругую, но и пластическую деформацию вплоть до его разрушения, поэтому нагревание герметичных аппаратов, полностью заполненных жидкостью или сжиженным газом, даже в пределах суточных колебаний температуры окружающего воздуха может создать в аппарате избыточное давление, достаточное для его разгерметизации [10].

**Цель лабораторной работы:** определение экспериментальным путем приращения давления при повышении температуры в аппарате, полностью заполненном огнеопасной жидкостью, расчет на основании полученных результатов коэффициента объемного расширения исследуемой жидкости, оценка пожарной опасности повышения давления в аппарате.

### 1.2.1. Краткие теоретические сведения

Давление, создаваемое жидкостью в полностью заполненном аппарате при тепловом воздействии, определяют по формуле:

$$p_k = p_n + \Delta p, \quad (1.10)$$

где  $p_k$  – конечное давление жидкости в аппарате, МПа;

$p_n$  – начальное давление жидкости в аппарате, МПа;

$\Delta p$  – приращение давления, МПа.

Приращение давления  $\Delta p$  в герметичном нагреваемом аппарате, полностью заполненном жидкостью (без учета изменения размеров аппарата), находят из выражения:

$$\Delta p = \frac{\beta_p}{\beta_{сж}} \Delta T, \quad (1.11)$$

где  $\beta_p$  – коэффициент объемного расширения жидкости,  $K^{-1}$ ;

$\beta_{сж}$  – коэффициент объемного сжатия жидкости,  $МПа^{-1}$ ;

$\Delta T = T_k - T_n$  – изменение температуры среды в аппарате, К;

$T_n$  и  $T_k$  – температуры среды в аппарате до и после нагрева соответственно, К.

Коэффициент объемного расширения  $\beta_p$  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 [10]:

$$\beta_p = \frac{\rho_n - \rho_k}{\rho_n \Delta T}, \quad (1.12)$$

где  $\rho_n$  и  $\rho_k$  – плотность жидкости до и после нагрева,  $кг/м^3$ , или из соотношения изменения объемов при повышении температуры [14]:

$$\beta_p = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta V}{V_n}, \quad (1.13)$$

где  $\Delta V = V_k - V_n$  – изменение объема жидкости при увеличении давления на величину  $\Delta p$ , м<sup>3</sup>;

$V_n$  и  $V_k$  – начальный и конечный объем жидкости, м<sup>3</sup>;

Считается, что жидкости являются несжимаемой физической средой. Тем не менее, сжимаемость капельных жидкостей под действием давления характеризуется коэффициентом объемного сжатия жидкости  $\beta_{сж}$ , который представляет собой относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления:

$$\beta_{сж} = -\frac{1}{V_n} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p}. \quad (1.14)$$

Знак минус в формуле (1.14) обусловлен тем, что положительному приращению давления  $p$  соответствует отрицательное приращение (т.е. уменьшение) объема жидкости.

При увеличении температуры жидкости профилактика защиты от разгерметизации оборудования достигается созданием в аппаратах пространства, свободного от жидкости, которое выполняет функцию компенсатора при тепловом расширении жидкости. В этом случае давление в аппарате не может быть больше давления насыщенных паров жидкости при данной температуре.

Максимально допустимую степень заполнения  $\varepsilon$  емкостных аппаратов определяют по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \beta_p \Delta T_{max}, \quad (1.15)$$

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

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

$$V_{св} = V_{ан} (1 - \varepsilon), \quad (1.16)$$

где  $V_{ан}$  – геометрический объем аппарата, м<sup>3</sup>.

Практика показывает, что для обеспечения безопасности степень заполнения  $\varepsilon$  должна быть:

- для емкостей и сосудов со сжиженными газами  $\varepsilon \leq 0,85-0,9$ ;
- для емкостей и сосудов с горючими жидкостями  $\varepsilon \leq 0,9-0,95$ .

Чтобы установленная норма заполнения не нарушалась, резервуары и другие аппараты с горючими жидкостями, а также со сжиженными газами обеспечиваются устройствами, сигнализирующими о пределе заполнения или исключаящими их переполнение.

### **1.2.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с электрооборудованием.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением 220 В.

4. Строго следить за показаниями избыточного давления в баллонах, заполненных испытуемой жидкостью, не допуская превышения им значения 2 МПа.

5. Приготовить сосуд с холодной водой для экстренного охлаждения баллонов при росте избыточного давления выше 2 МПа.

Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

### **1.2.3. Лабораторная установка**

На рис. 1.4 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования повышения давления в нагреваемом аппарате.

Лабораторная установка моделирует опасные последствия воздействия солнечной радиации и тепла окружающей среды на технологическое оборудование с горючими жидкостями при колебаниях суточной температуры окружающего воздуха.

Лабораторная установка (рис. 1.4) включает стальные баллоны 3.1 и 3.2 из нержавеющей стали с внутренним объемом 1 л.

Экспериментальный баллон 3.1 укомплектован гидравлическим манометром 1, а контрольный баллон 3.2 – измерительной бюреткой 2 для контроля за изменением объема жидкости внутри баллона при нагревании.

Баллоны 3.1 и 3.2 помещаются в наполненный теплоносителем (водой) сосуд 6. Нагрев теплоносителя в сосуде 6 осуществляется теплоэлектронагревательными элементами 7. С целью равномерного нагрева всего объема теплоносителя используется электрическая мешалка 4. Температура теплоносителя фиксируется контактным термометром 5.

Баллоны 3.1 и 3.2 полностью заполняются испытуемой жидкостью (водой или нефтепродуктом). Подключенный к экспериментальному баллону 3.1 манометр 1 позволяет зафиксировать начальное давление  $p_n$  жидкости в аппарате и конечное давление  $p_k$ , наблюдающееся через заданный промежуток времени  $\Delta\tau$  при нагревании жидкости. Присоединенная к контрольному баллону 3.2 измерительная бюретка 2 позволяет опосредованно определить соответствующее изменение объема  $\Delta V = V_k - V_n$  жидкости в баллоне за заданный промежуток времени  $\Delta\tau$  при нагреве от  $T_n$  до  $T_k$ .

[Видеоматериал](#), иллюстрирующий последовательность проведения натурального эксперимента с использованием лабораторной установки (рис. 1.4), доступен по ссылке, представленной в виде QR-кода.



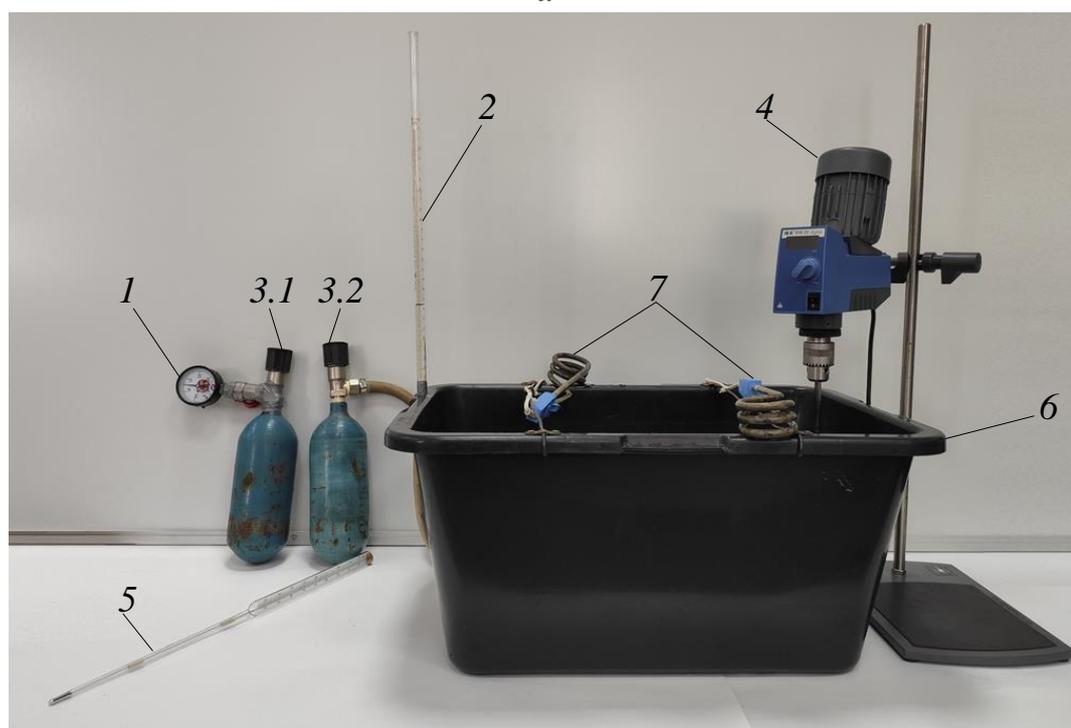
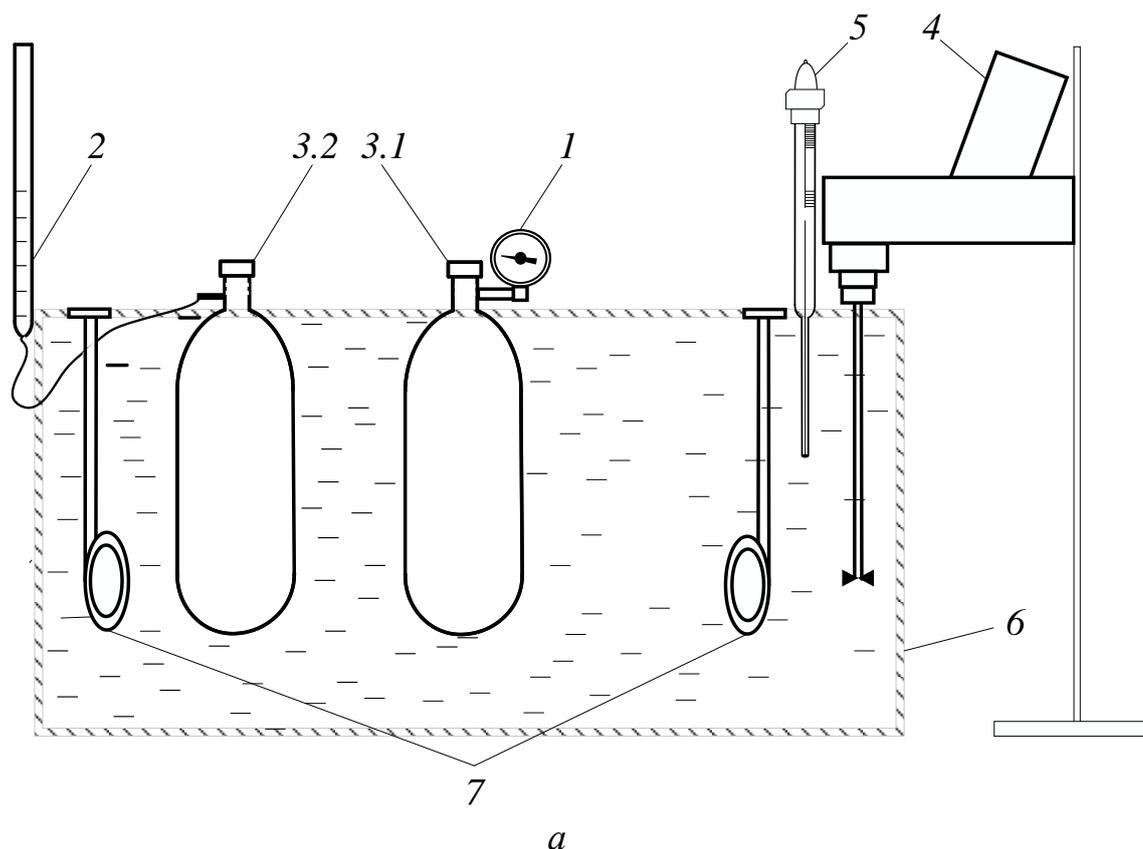


Рисунок 1.4 – Схема лабораторной установки для исследования повышения давления в нагреваемом аппарате

*a* – принципиальная схема; *б* – общий вид:

*1* – манометр; *2* – измерительная бюретка;

*3.1, 3.2* – баллоны с испытуемой жидкостью; *4* – электрическая мешалка;

*5* – контактный термометр; *б* – сосуд с теплоносителем (водой);

*7* – теплоэлектронагревательные элементы (ТЭНы)

Исходными данными для проведения эксперимента и выполнения расчетов являются:

1. Характеристики исследуемой жидкости:
  - наименование (задается преподавателем);
  - коэффициенты объемного теплового расширения и сжатия жидкости (определяются по приложению И).
2. Максимальное давление в баллоне 3.1 (2 МПа).
3. Интервалы времени  $\Delta\tau$ , через которые фиксируются показания приборов (задаются преподавателем в зависимости от испытываемой жидкости).
4. Объем баллонов 3.1 и 3.2 (0,001 м<sup>3</sup>).

#### **1.2.4. Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Изучить теоретические сведения.
2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
3. Разделиться на две подгруппы для проведения эксперимента. Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.
4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента (наименование жидкости), баллоны 3.1 и 3.2, наполненные испытываемой жидкостью.
5. В журнал проведения испытаний (приложение Б) записать исходные данные.
6. Заполнить сосуд 6 тридцатью литрами воды комнатной температуры.
7. Поместить в сосуд 6 баллоны 3.1 и 3.2, а также контактный термометр 5.
8. Зафиксировать с использованием:
  - контактного термометра 5 – начальную температуру жидкости  $T_n$ ;

- манометра  $1$  – начальное давление жидкости  $p_n$ ;
- измерительной бюретки  $2$  – начальное значение объема  $V_n$ .

Записать в табл. 1.2 соответствующие показания приборов (эксперимент №1).

9. ТЭНы  $7$  и электрическую мешалку  $4$  включить в электросеть  $220$  В.

10. Через заданный интервал времени  $\Delta\tau$  измерить и записать в табл. 1.2 конечные значения температуры  $T_k$ , давления  $p_k$ , объема жидкости  $V_k$  в аппарате, используя показания термометра  $5$ , манометра  $1$ , измерительной бюретки  $2$  соответственно (эксперимент №1).

11. Провести серию экспериментов, фиксируя в табл. 1.2 показания приборов через равные интервалы времени  $\Delta\tau$  – конечные значения температуры  $T_k$ , давления  $p_k$ , объема жидкости  $V_k$  в аппарате (эксперимент №2, 3,...). При достижении давлением в баллоне  $3.1$  значения  $2$  МПа прекратить эксперименты.

12. Электроприборы отключить от электросети. Баллоны  $3.1$  и  $3.2$  извлечь из сосуда  $б$ , поместить в приготовленный сосуд с холодной водой.

13. Обработать экспериментальные данные и занести результаты в табл. 1.2:

13.1. Заполнить в табл. 1.2 ячейки с начальными значениями температуры  $T_n$ , давления  $p_n$ , объема жидкости  $V_n$  в аппарате для каждого эксперимента (№2, 3,...) по алгоритму:  $T_{n_i} = T_{k_{i-1}}$ ,  $p_{n_i} = p_{k_{i-1}}$ ,  $V_{n_i} = V_{k_{i-1}}$ .

13.2. Заполнить в табл. 1.2 ячейки со значениями приращения температуры  $\Delta T$ , давления  $\Delta p$ , объема  $\Delta V$  жидкости в аппарате для каждого эксперимента.

13.3. Используя формулу (1.13), рассчитать коэффициент объемного расширения жидкости  $\beta_p$  для каждого эксперимента. Результаты занести в табл. 1.2.

13.4. Используя формулу (1.14), рассчитать коэффициент объемного сжатия

жидкости  $\beta_{сж}$  для каждого эксперимента. Результаты занести в табл. 1.2.

13.5. Для каждого диапазона температур рассчитать максимально допустимую степень заполнения  $\varepsilon$  аппарата с испытуемой жидкостью, используя формулу (1.15). Результаты занести в табл. 1.2.

13.6. Построить график зависимости давления от температуры жидкости внутри сосуда  $p = f(T)$ .

14. Сравнить результаты расчета  $\beta_p$  и  $\beta_{сж}$  со справочными значениями (приложение И). Сделать вывод.

15. Оценить опасность роста давления в экспериментальном баллоне, полностью заполненном жидкостью, при нагревании.

16. Сформулировать меры пожарной безопасности, направленные на предотвращение опасности разгерметизации аппаратов, полностью заполненных пожароопасными жидкостями, при воздействии на них тепла окружающей среды.

17. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 1.2 – Экспериментальные и расчетные данные

№ п/п	Показатели жидкости		Эксперимент			
			№1	№2	№3	...
1.	Температура, К	начальная $T_n$				
		конечная $T_k$				
		приращение $\Delta T$				
2.	Давление, МПа	начальное $p_n$				
		конечное $p_k$				
		приращение $\Delta p$				
3.	Объем, мл	начальный $V_n$				
		конечный $V_k$				
		приращение $\Delta V$				
4.	Коэффициент объемного расширения жидкости $\beta_p$ , $K^{-1}$					
5.	Коэффициент объемного сжатия жидкости $\beta_{сж}$ , $MPa^{-1}$					
6.	Максимально допустимая степень заполнения $\varepsilon$					

### 1.2.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Исходные данные.
4. Результаты измерений, обработки экспериментальных данных и расчетов (табл. 1.2), в том числе использующиеся формулы.
5. График зависимости  $p = f(T)$ .
6. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

### 1.2.6. Контрольные вопросы

1. Укажите причины разгерметизации технологических аппаратов, полностью заполненных жидкостью, при воздействии на них тепла окружающей среды.

2. Укажите меры пожарной безопасности, направленные на предотвращение опасности повышения давления в технологическом оборудовании с горючими жидкостями при воздействии на них тепла окружающей среды и солнечной радиации.

3. Напишите формулу, по которой можно определить максимально допустимую степень заполнения аппарата жидкостью, если известна максимально возможная амплитуда колебаний температуры.

4. Напишите формулу, по которой можно определить давление, создаваемое жидкостью в полностью заполненном аппарате при его нагревании.

5. Назовите основные параметры, характеризующие пожарную опасность нагреваемых герметичных сосудов, полностью заполненных

огнеопасными жидкостями, при воздействии на них тепла окружающей среды.

6. Объясните причины значительного повышения давления в аппарате, полностью заполненном жидкостью, если известно, что все тела (жидкость и стенки сосуда) при нагревании расширяются.

7. Обоснуйте, почему в аппарате, частично заполненном жидкостью, наблюдается незначительное повышение давления при нагревании.

8. Объясните, чем вызвано повышение давления в аппарате, частично заполненном жидкостью, и как определить его численное значение.

9. Перечислите, чем на практике обеспечивается безопасность операций заполнения технологических аппаратов.

## 2. ИСТОЧНИКИ ЗАЖИГАНИЯ

Условием возникновения горения является одновременное присутствие в определенной точке пространства горючей среды и источника инициирования процесса горения – источника зажигания.

Производственные источники зажигания классифицируют: по продолжительности действия, природе образования, запасу тепловой энергии, месту возникновения и другим признакам.

По продолжительности действия источники зажигания подразделяются на постоянно действующие и потенциально возможные; по природе образования – на тепловое проявление химической энергии, тепловое проявление механической энергии, тепловое проявление электрической энергии и т.п.; по запасу тепловой энергии – на низкокалорийные и высококалорийные [13].

## 2.1. Исследование узла трения как источника зажигания

Перегрев подшипников и других узлов трения – распространенная причина возникновения пожаров в текстильной, деревоперерабатывающей, картонно-бумажной и других отраслях промышленности, в сельском и коммунальном хозяйствах, а также на транспорте. Основной причиной перегрева является тепловое проявление механической энергии вследствие нарушения режима смазки узлов трения. При нормальном режиме между трущимися поверхностями подшипников находится слой смазки в жидком состоянии (гидродинамический режим), обеспечивающий низкий коэффициент трения (0,001-0,05). При вытекании смазки из узла трение переходит сначала в режим полусухого, а затем сухого трения. При этом коэффициент трения существенно возрастает. Особенно резко возрастает коэффициент трения при попадании в подшипники песка и грязи, что влечет за собой появление задиров на трущихся поверхностях и еще более быстрое возрастание коэффициента трения [14].

**Цель лабораторной работы:** исследование явления трения как возможного источника зажигания горючей среды.

### 2.1.1. Краткие теоретические сведения

При работе машин и механизмов узлы, в которых движущиеся части сопрягаются с неподвижными, нагреваются вследствие трения. Количество выделяющегося при трении тепла  $dQ_{mp}$  определяют по формуле [13]:

$$dQ_{mp} = F_{mp} \cdot dl, \quad (2.1)$$

где  $F_{mp}$  – сила трения, Н;

$dl$  – элементарное относительное перемещение трущихся пар, м.

Величину сил трения в трущихся парах можно оценить по следующим формулам:

$$\text{при скольжении пар: } F_{mp} = f N ; \quad (2.2)$$

$$\text{при качении пар: } F_{mp} = k \frac{N}{r}, \quad (2.3)$$

где  $f$  – безразмерный коэффициент трения скольжения, зависящий от свойств материала трущихся пар, качества их обработки, наличия между ними смазки, скорости скольжения и других факторов;

$N$  – сила нормального давления между трущимися парами, Н;

$k$  – коэффициент трения качения, зависящий от свойств материала трущихся пар, состояния их поверхностей и многих других факторов, м;

$r$  – радиус катящегося тела, м.

Выделяющееся за элементарный промежуток времени  $d\tau$  в трущейся паре тепло  $dQ_{mp}$  расходуется на нагревание узла трения  $dQ_{нагр}$ , отводится системой охлаждения  $dQ_{охл}$  и теряется в окружающую среду  $dQ_{пот}$ .

Уравнение теплового баланса узла трения в общем случае имеет вид:

$$dQ_{mp} = dQ_{нагр} + dQ_{охл} + dQ_{пот}. \quad (2.4)$$

Величину  $dQ_{mp}$  при равномерном вращательном движении, с учетом (2.1) и (2.2), можно найти из выражения:

$$dQ_{mp} = f N \frac{d_n}{2} \omega d\tau = f N d_n \pi \nu d\tau, \quad (2.5)$$

где  $d_n$  – диаметр вращающейся детали (шейки подшипника, барабана транспортера и т.д.), м;

$\omega$  – угловая скорость, рад/с;

$\nu$  – частота вращения, с<sup>-1</sup>.

Пусть  $b = f N d_n \pi \nu$ , тогда выражение (2.5) примет вид:

$$dQ_{mp} = b d\tau. \quad (2.6)$$

Величина  $dQ_{нагр}$  зависит от массы нагреваемых деталей  $m$ , средней удельной теплоемкости металла  $c_t$  и продолжительности нагрева  $d\tau$ :

$$dQ_{нагр} = m c_t d\tau. \quad (2.7)$$

В расчетах целесообразно принять равным нулю количество отводимого тепла системой охлаждения, что будет соответствовать наиболее неблагоприятному случаю:

$$dQ_{oxl} = 0. \quad (2.8)$$

Потери тепла в окружающую среду определяются выражением:

$$dQ_{nom} = \alpha(t - t_{cp})S d\tau, \quad (2.9)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплообмена от узла трения в окружающую среду, вычисляемый по формулам:

$$\text{при } t \leq 60 \text{ }^\circ\text{C: } \alpha = 4,07\sqrt[3]{t - t_{cp}}; \quad (2.10)$$

$$\text{при } t > 60 \text{ }^\circ\text{C: } \alpha = 11,63e^{0,0023t}; \quad (2.11)$$

$t$  – температура узла трения (корпуса подшипника, барабана и т. п.),  $^\circ\text{C}$ ;

$t_{cp}$  – температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ;

$S$  – площадь поверхности теплообмена,  $\text{м}^2$ .

После подстановки значений (2.6)–(2.9) в уравнение (2.2) и преобразований можно получить выражение (2.12) для определения температуры  $t$  узла трения в любой момент времени  $\tau$  после возникновения аварийной ситуации, т.е. после прекращения отвода тепла системой охлаждения:

$$t = t_{cp} + \frac{b}{\alpha S} \left( 1 - e^{-\frac{\alpha S \tau}{mc_r}} \right). \quad (2.12)$$

При этом максимальная температура  $t_{max}$  в узле трения (при  $\tau \rightarrow \infty$ ) определяется по формулой:

$$t_{max} = t_{cp} + \frac{b}{\alpha S}. \quad (2.13)$$

На действующих производствах отмечены случаи возгорания горючих материалов вследствие перегрева подшипников и сальников машин, барабанов и лент транспортеров и норий, шкивов и приводных ремней, выделения тепла при обработке древесины, пластмасс и металлов резанием, таблетировании лекарств, прессовании пластмасс и отходов древесины, а также при сжатии газов.

Подшипники скольжения сильнонагруженных и высокооборотистых валов и осей машин могут перегреваться вследствие некачественной смазки, загрязнения подшипников, перекосов валов, чрезмерной затяжки подшипников, перегрузки машин, загрязнения корпусов подшипников отложениями и ряда других причин.

При наличии систем централизованной смазки перегрев подшипников, помимо указанных причин, происходит из-за повышения температуры масла, поступающего в подшипники, снижения расхода масла и его загрязнения масла примесями [13].

Примерную температуру подшипников в случае прекращения их охлаждения можно определить по формулам (2.12) и (2.13).

### **2.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с электрооборудованием.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением 220 В.

4. При выполнении лабораторной работы возможно воздействие на обучающихся следующих опасных и вредных производственных факторов:

- термические ожоги при нагревании жидкостей и различных физических тел;
- порезы рук при небрежном обращении с лабораторной посудой и приборами;
- поражение электрическим током при работе с электроустановками.

5. Запрещается касаться движущихся частей лабораторной установки.

6. Запрещается касаться нагреваемых в ходе эксперимента элементов до их остывания.

7. При проведении экспериментов с грузом, необходимо сначала осуществить запуск двигателя, затем плавным движением опустить платформу с грузом.

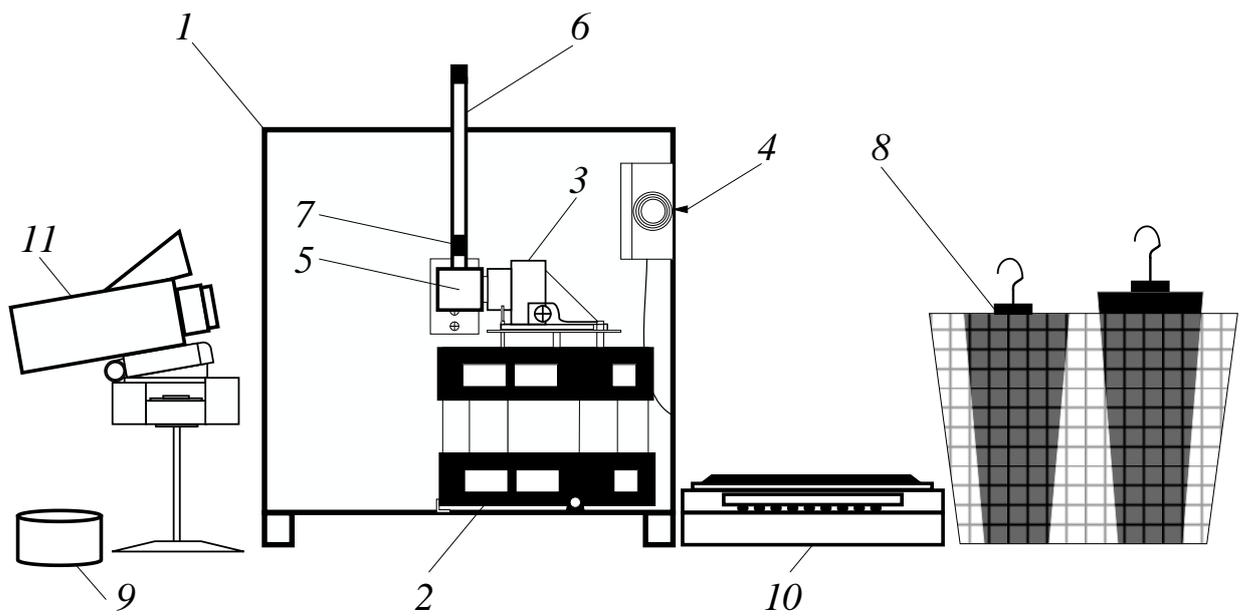
8. При замене элемента пары трения, необходимо использовать перчатки.

Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

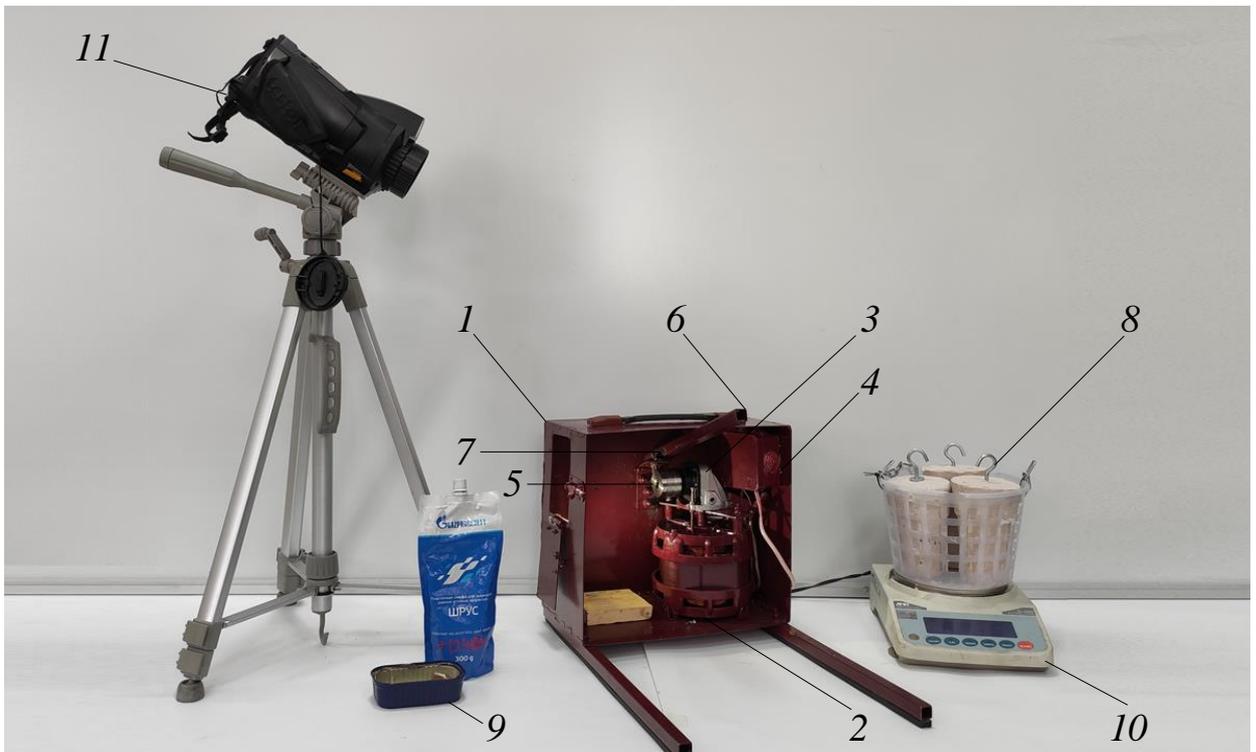
### **2.1.3. Лабораторная установка**

На рис. 2.1 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования узла трения как источника зажигания. Лабораторная установка позволяет исследовать явление трения как возможного источника зажигания при вращении элементов технологического оборудования, а также оценить эффективность применения различных видов смазок для снижения количества теплоты, выделяющегося в узлах.

Установка состоит из асинхронного двигателя 2 (АД 180-4/71С1УХЛ4) с редуктором 3, на валу которого установлена заменяемая насадка 5, и рычага 6, выполненного в форме полой трубы квадратного сечения, в нижнюю торцевую часть которой вставляется и фиксируется заменяемый элемент 7. Рычаг 6 предназначен для создания усилия на вал редуктора, регулируемого при помощи смены груза 8, который подвешивается на конце рычага. Заменяемая насадка 5 на валу редуктора 3 вместе с заменяемым элементом 7, находящимся в рычаге 6, создают пару трения. Для смазывания трущихся поверхностей предусмотрен контейнер со смазкой 9. Двигатель 2, редуктор 3 и пара трения 5, 7 расположены внутри корпуса 1, который представляет собой металлическую камеру с фронтальной съемной стенкой и специальным отверстием для установки регистрационного оборудования – тепловизора 11.



*а*



*б*

Рисунок 2.1 – Схема лабораторной установки для исследования узла трения как источника зажигания

*а* – принципиальная схема; *б* – общий вид:

1 – металлический корпус; 2 – двигатель; 3 – редуктор; 4 – пускатель;

5 – заменяемая насадка на валу редуктора;

6 – рычаг для создания усилия на вал редуктора;

7 – заменяемый элемент пары трения; 8 – комплект грузов;

9 – контейнер для смазки; 10 – электронные весы; 11 – тепловизор

При выполнении эксперимента асинхронный двигатель 2 после включения в электросеть 220 В приводится в рабочее состояние пускателем 4, в результате чего вал редуктора 3 с насадкой 5 начинает вращаться. При помощи рычага 6, в который вставлен образец 7, и грузов 8 создается усилие на валу редуктора 3. За счет трения начинает выделяться тепловая энергия и расти температура в узле трения – между насадкой 5 и образцом 7. Изменение температуры регистрируется тепловизором 11 (Testo 885-1).

[Видеоматериал](#), иллюстрирующий последовательность проведения натурального эксперимента с использованием лабораторной установки (рис. 2.1), доступен по ссылке, представленной в виде QR-кода.



Для исследования трения как возможного источника зажигания в рамках лабораторной работы необходимо провести несколько экспериментов, в ходе которых фиксируется температура на поверхности узла трения при различных весовых нагрузках и видах смазки (без смазки, смазка литол-24, смазка солидол, пластичная смазка для шарниров равных угловых скоростей).

#### **2.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Изучить теоретические сведения.
2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
3. Разделиться на четыре подгруппы для проведения эксперимента.

Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.

4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента (массы грузов, вид смазки), испытуемые смазки (литол-24, солидол, пластичная смазка для шарниров равных угловых скоростей),

дополнительное лабораторное оборудование (термометр, секундомер).

5. В журнал проведения испытаний (приложение В) записать исходные данные, используя предварительные измерения.

6. Провести эксперимент №1 «Исследование трения как возможного источника зажигания без использования смазки» в следующем порядке:

6.1. Вставить в рычаг 6 заменяемый элемент 7, плотно зафиксировав его в рычаге.

6.2. Включить тепловизор 11.

6.3. Ориентировать тепловизор 11 таким образом, чтобы в центре его экрана была видна поверхность соприкосновения элемента 7 и насадки 5 на валу редуктора 3.

6.4. Рычаг 6 приподнять и удерживать в верхнем положении.

6.5. Включить установку в электрическую сеть 220 В.

6.6. Запустить двигатель 2 пускателем 4.

6.7. Начать отсчет времени, опустив рычаг 6 на вращающуюся насадку 5, расположенную на валу редуктора 3.

6.8. На экране тепловизора 11 наблюдать изменение температуры в точке соприкосновения элемента 7 и насадки 5 каждые 10 секунд до момента, пока значение температуры не перестанет расти в течение 20 секунд.

6.9. Полученное значение температуры  $t_1$  занести в табл. 2.1.

6.10. Для получения достоверных результатов проделать опыт еще дважды, предварительно дав остыть валу редуктора до комнатной температуры. Результаты измерения температуры на поверхности узла трения  $t_2$ ,  $t_3$  занести в табл. 2.1.

6.11. Вычислить и занести в табл. 2.1 среднее арифметическое значение результатов измерения температуры в трех опытах:  $\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3}$ .

6.12. Подготовить при помощи комплекта грузов 8 и лабораторных весов 10 грузы с заданной массой.

6.13. Подвесить на конец рычага  $b$  груз наименьшей массы и повторить пп. 6.3-6.11.

6.14. Провести аналогичные испытания с остальными грузами.

6.15. Используя значение массы груза  $m$ , для каждого опыта вычислить нагрузку – силу  $N$ , действующую на вал двигателя по выражению:

$$N = 3,3mg, \quad (2.14)$$

где  $m$  – масса груза, подвешиваемого на конец рычага, кг;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>. Результаты занести в табл. 2.1.

6.16. Построить графики зависимости средней температуры от создаваемой нагрузки  $\bar{t} = f(N)$ .

7. Провести эксперимент №2 «Исследование трения как возможного источника зажигания с использованием смазки» в следующем порядке:

7.1. Заполнить контейнер для смазки 9 на  $\frac{1}{3}$  заданным смазывающим веществом.

7.2. Повторить пп. 6.1-6.16.

8. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 2.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Эксперимент		Масса груза $m$ , кг	Нагрузка $N$ , Н	Температура на поверхности узла трения $t$ , °C			
				$t_1$	$t_2$	$t_3$	$\bar{t}$
№1. Без смазки	1.1.	0					
	1.2.						
	1.3.						
	1.4.						
№2. Со смазкой	2.1.	0					
	2.2.						
	2.3.						
	2.4.						
«_____»							

### 2.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Исходные данные.
4. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных (табл. 2.1), в том числе расчетные формулы.
5. Графики зависимостей  $\bar{t} = f(N)$  (2 графика – по каждому проведенному эксперименту).
6. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

### 2.1.6. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятие «источник зажигания».
2. Укажите основные признаки классификации источников зажигания.
3. Объясните, при каких условиях нагретое тело может стать источником вынужденного зажигания горючей смеси.
4. Назовите факторы, влияющие на величину силы трения.
5. Перечислите причины перегрева подшипников скольжения и способы обеспечения пожарной безопасности.
6. Приведете примеры возгорания горючих материалов вследствие перегрева подшипников.
7. Напишите уравнение теплового баланса узла трения.
8. Напишите формулу для определения температуры узла трения после прекращения отвода тепла системой охлаждения.
9. Поясните порядок проведения эксперимента.

10. В каких расчетах используются найденные экспериментально характеристики?

11. Дайте характеристику испытуемым смазкам (физико-химические показатели, рекомендуемый рабочий температурный диапазон, область применения).

## **2.2. Исследование электрических искр как источника зажигания**

Реконструкция промышленных предприятий практически всегда связана с проведением огневых работ на технологическом оборудовании, к которым относится сварка. Сварка сопровождается искрообразованием и нагреванием технологического оборудования до температур, способных вызвать воспламенение горючих веществ и материалов.

Наиболее частые причины пожаров при проведении сварочных работ: контакт раскаленной электрической дуги с горючими смесями; попадание брызг расплавленного металла, пламени горелки, резака или электродных огарков на воспламеняющиеся материалы и конструкции; нагрев трудносгораемых конструкций и коммуникаций сварочного оборудования до температуры воспламенения.

С точки зрения пожарной безопасности сварочные работы представляют высокий риск возникновения пожара.

**Цель лабораторной работы:** экспериментальная оценка пожарной опасности электрических искр, образующихся при ручной дуговой сварке металлов.

### **2.2.1. Краткие теоретические сведения**

Процесс электрической дуговой сварки, как правило, сопровождается разлетом на значительные расстояния во всех направлениях сравнительно больших по размерам частиц расплавленного металла. Размер капель металла при этом достигает 3 мм (при потолочной сварке – 4 мм), а их скорость не превышает 4 м/с [3].

Брызги расплавленного металла достигают температуры 2100 °С, способной воспламенить большинство горючих материалов, а энергия такого источника тепла на несколько порядков превышает минимальную энергию зажигания любых горючих смесей [13].

Энергию зажигания  $W$  – количество теплоты, которое капля металла способна отдать горючей среде в процессе остывании до температуры ее самовоспламенения, рассчитывают следующим способом [3]:

1. Вычисляют среднюю скорость полета капли металла при свободном падении  $\omega_k$ , по формуле:

$$\omega_k = 0,5\sqrt{2gH}, \text{ м/с}, \quad (2.15)$$

где  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$H$  – высота падения, м.

2. Вычисляют объем капли металла  $V_k$  по формуле:

$$V_k = \frac{\pi d_k^3}{6}, \text{ м}^3, \quad (2.16)$$

где  $d_k$  – диаметр капли, м.

3. Вычисляют массу капли  $m_k$  по формуле:

$$m_k = V_k \rho_k, \text{ кг}, \quad (2.17)$$

где  $\rho_k$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>.

4. Вычисляют продолжительность полета капли  $\tau$  по формуле:

$$\tau = \frac{H}{\omega_k}, \text{ с}. \quad (2.18)$$

5. В зависимости от продолжительности полета капли  $\tau$  возможны три ее состояния: жидкое, кристаллизации, твердое.

5.1. Время полета капли в расплавленном (жидком) состоянии  $\tau_p$  рассчитывают по формуле:

$$\tau_p = \frac{C_p \cdot m_k}{\alpha \cdot S_k} \ln \frac{T_n - T_0}{T_{пл} - T_0}, \text{ с}, \quad (2.19)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость расплава металла, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;

$S_k = \pi d_k^2$  – площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>;

$T_n$ ,  $T_{пл}$  – температура капли в начале полета и температура плавления металла соответственно, К;

$T_0$  – температура окружающей среды (воздуха), К;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи металла, Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , входящий в выражение (2.19), определяют в следующей последовательности:

а) вычисляют число Рейнольдса  $Re$  по формуле:

$$Re = \frac{\omega_{\kappa} \cdot d_{\kappa}}{\nu}, \quad (2.20)$$

где  $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре 20 °С, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;

б) вычисляют критерий Нуссельта  $Nu$  по формуле:

$$Nu = 0,62 Re^{0,5} \quad (2.21)$$

в) вычисляют коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{в}}}{d_{\kappa}}, \quad (2.22)$$

где  $\lambda_{\text{в}} = 2,2 \cdot 10^{-5}$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Если  $\tau < \tau_p$ , т.е. время нахождения искры в расплавленном состоянии значительно больше времени полета искры, то конечную температуру капли  $T_{\text{кон}}$  определяют по формуле:

$$T_{\text{кон}} = T_0 + (T_n - T_0) e^{-\frac{\alpha \cdot S_{\kappa} \cdot \tau}{C_p \cdot m_{\kappa}}}, \text{ К.} \quad (2.23)$$

5.2. Время полета капли  $\tau_{\text{кр}}$ , в течение которого происходит ее кристаллизация, определяют по формуле:

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{m_{\kappa} \cdot C_{\text{кр}}}{\alpha \cdot S_{\kappa} (T_{\text{пл}} - T_0)}, \text{ с,} \quad (2.24)$$

где  $C_{\text{кр}}$  – удельная теплота кристаллизации металла, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Если  $\tau_p < \tau \leq \tau_p + \tau_{\text{кр}}$ , то конечную температуру капли  $T_{\text{кон}}$  определяют по формуле:

$$T_{\text{кон}} = T_{\text{пл}}, \text{ К.} \quad (2.25)$$

Если  $\tau > \tau_p + \tau_{кр}$ , то конечную температуру капли  $T_{кон}$  в твердом состоянии определяют по формуле:

$$T_{кон} = T_0 + (T_{пл} - T_0) e^{\left\{ -\frac{\alpha \cdot S_k}{C_k \cdot m_k} \cdot [\tau - (\tau_p + \tau_{кр})] \right\}}, \text{ К}, \quad (2.26)$$

где  $C_k$  – удельная теплоемкость металла, Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

6. Энергию зажигания  $W$  вычисляют по формуле:

$$W = V_k \cdot \rho_k \cdot C_k \cdot (T_{кон} - T_{св}) \cdot K, \text{ Дж}, \quad (2.27)$$

где  $T_{св}$  – температура самовоспламенения горючего материала, К;

$K$  – коэффициент, равный отношению тепла, отданного горючему веществу, к энергии, запасенной в капле. Если отсутствует возможность определения коэффициента  $K$ , то принимают  $K = 1$ .

### **2.2.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с электрооборудованием.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением 220 В.

4. Экспериментальная часть работы связана с возможностью выделения токсичных и пожаровзрывоопасных паров и газов и должна проводиться только в вытяжном шкафу.

5. Сварочный аппарат можно подключать к розетке бытовой электросети 220 В только при наличии на ней заземления. Запрещается применять для подключения установки провода и кабели, которые не могут обеспечить достаточный уровень электроконтакта, либо имеют признаки поврежденной изоляции.

6. Оператор сварочного аппарата обязан проводить работы в маске сварщика для защиты глаз.

7. В случае загорания горючих материалов производится тушение одним из следующих способов:

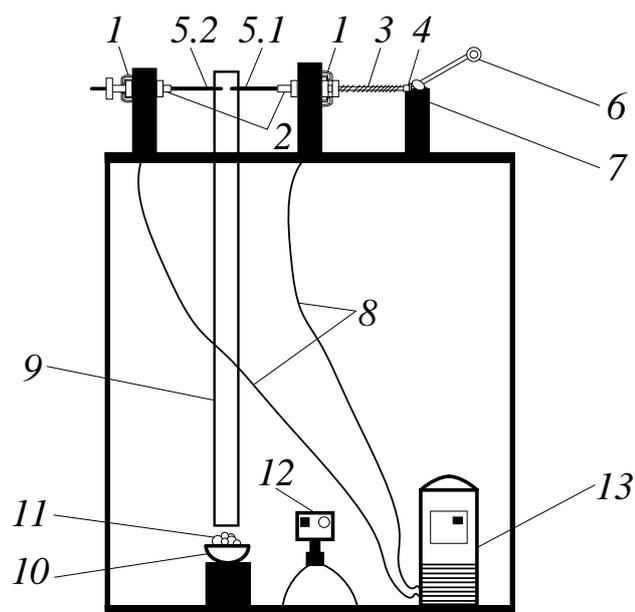
- охлаждение зоны горения огнетушащими веществами или посредством перемешивания горючего;
- разбавление горючего или окислителя огнетушащими веществами;
- изоляция горючего от зоны горения или окислителя огнетушащими веществами и (или) иными средствами;
- химическое торможение реакции горения огнетушащими веществами.

Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

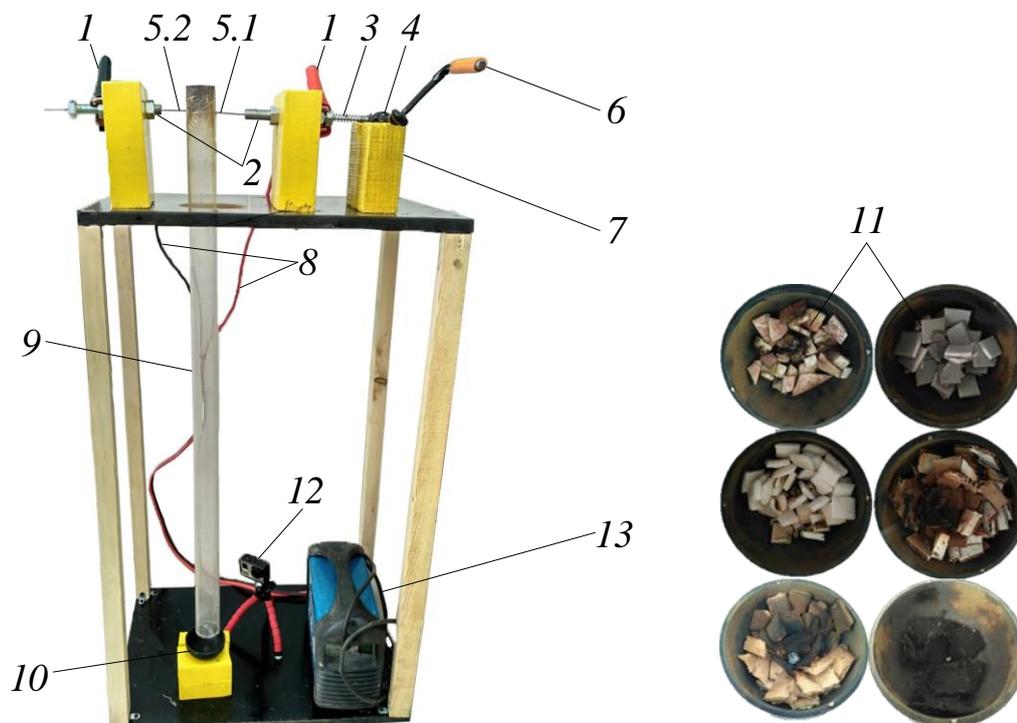
### **2.2.3. Лабораторная установка**

На рис. 2.2 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования электрических искр как источника зажигания. Лабораторная установка позволяет исследовать явление воспламенения горючей нагрузки каплями расплавленного металла, образующимися в процессе электрической дуговой сварки.

Лабораторная установка включает электроды 5.1 и 5.2 (диаметр электродов 3 мм, длина электрода 5.1 – 30 см, длина электрода 5.2 – 25 см, концы электродов заточены под углом 30°), закрепленные на элементах 7 при помощи зажимов 1 и болтов 2. Для создания электрической дуги электроды 5.1 и 5.2 через провода 8 подсоединяются к сварочному аппарату 13, служащему источником питания сварочного тока.



*a*



*б*

Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки для исследования электрических искр как источника зажигания

*a* – принципиальная схема; *б* – общий вид;

- 1 – зажимы; 2 – болты с отверстием 3 мм; 3 – пружина; 4 – эксцентрик; 5.1, 5.2 – электроды; 6 – металлическая стальная ручка с диэлектрической пластмассовой насадкой; 7 – крепежные элементы; 8 – провода; 9 – кварцевая жаростойкая труба; 10 – чугунная чаша; 11 – горючий материал; 12 – экшн-камера; 13 – сварочный аппарат

При вращении оператором металлической ручки 6 лабораторной установки через эксцентрик 4 создается поступательное движение электрода 5.1 в сторону электрода 5.2. При касании электродов 5.1 и 5.2 образуется электрическая дуга, которая плавит оба электрода. В результате нескольких касаний за короткий промежуток времени на электродах начинает образовываться капля расплавленного металла. Под действием силы тяжести капля отделяется от электродов и падает во внутреннем пространстве кварцевой жаростойкой трубы 9 в чугунную чашу 10, заполненную горючим материалом 11. В результате теплопередачи от капли металла происходит воспламенение горючего материала 11. Экшн-камера 12 (GoPro Hero 3) фиксирует процесс от момента попадания капли металла на горючий материал 11 до момента воспламенения.

Время, за которое капля металла воспламеняет материал 11, будет называться временем зажигания  $t_{зж}$ . По известным значениям высоты падения капли  $H$  и диаметра капли  $d_k$  можно определить конечную температуру капли  $T_{кон}$  и энергию зажигания  $W$ , используя выражения (2.15)-(2.27).

Для исследования электрических искр как возможного источника зажигания в рамках лабораторной работы необходимо провести несколько экспериментов, в ходе которых фиксируется диаметр капли металла и время зажигания различных видов горючего материала (линолеум поливинилхлоридный, пластик, древесно-волоконистая плита, ткань, пенопласт и картон).

Исходными данными для проведения эксперимента и выполнения расчетов являются:

1. Испытуемый горючий материал:

- наименование (задается преподавателем);
- пожароопасные свойства (определяются по справочнику [9]).

2. Теплофизические свойства материала электродов 5.1 и 5.2 (указаны в приложении К).
3. Высота падения капли (высота жаростойкой трубы 9) (определяется измерением).
4. Температура окружающей среды (воздуха) (определяется измерением).

#### **2.2.4. Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Изучить теоретические сведения.
2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
3. Разделиться на две подгруппы для проведения эксперимента. Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.
4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента: наименование испытуемых горючего материала и материала электродов, а также дополнительное лабораторное оборудование (термометр, штангенциркуль).
5. В журнал проведения испытаний (приложение Г) записать исходные данные, используя справочные значения [9] и предварительные измерения.
6. Установить экшн-камеру 12 таким образом, чтобы ее объектив был направлен на чашу 10 и позволял зафиксировать момент попадания в чашу капли металла и воспламенения горючего материала 11. Обеспечить сопряжение экшн-камеры 12 со смартфоном по сети Wi-Fi.
7. Убедиться в надежности соединений электрической цепи:
  - конец проводов 8, на котором расположен штекер, соединен с разъемом сварочного аппарата 13;
  - концы проводов 8, на которых расположены зажимы 1, присоединены к болтам установки 2.

8. Подключить сварочный аппарат *13* к электросети 220 В. Перевести тумблер включения аппарата в положение «Включено». Перевести тумблер регулировки силы тока аппарата в положение «150 А».

9. Надеть маску сварщика для защиты глаз обучающемуся-оператору сварочного аппарата.

10. Провести эксперимент в следующем порядке:

10.1. Образец горючего материала *11* поместить в чугунную чашу *10*, расположенную на деревянной подставке.

10.2. Оператору сварочного аппарата вращательным движением металлической ручки *б* (держась за ее диэлектрическую пластмассовую насадку), приблизить электрод *5.1* к электроду *5.2*. В результате нескольких касаний электродов происходит образование электрической дуги и плавление металла. Оператору необходимо следить за моментом отделения капли расплавленного металла от электродов, после чего прекратить вращение ручки *б*, чтобы избежать повторного отделения капель и их попадания в чашу с горючим материалом.

10.3. Дождаться загорания горючего материала *11*, находящегося в чаше *10*.

10.4. Потушить горючий материал *11* одним из способов, указанных в п. 2.2.2.

10.5. Изъять из чаши *10* каплю металла, воспламенившую горючий материал *11*. С помощью штангенциркуля измерить ее диаметр  $d_k$ . Результаты измерения занести в табл. 2.2.

11. Повторить эксперимент (пп. 10.1-10.5) девять раз.

12. Перевести тумблер включения сварочного аппарата *13* в положение «Выключено». Отключить аппарат от электросети 220 В.

13. С флеш-накопителя экшн-камеры *12* перенести на жесткий диск компьютера записанный видеоматериал в формате wmv. Используя программу для просмотра видео, определить время зажигания горючего материала  $t_{зжж}$  в каждом опыте. Результаты занести в табл. 2.2.

14. Рассчитать конечную температуру капли  $T_{кон}$  и энергию зажигания  $W$  в каждом опыте, используя выражения (2.15)-(2.27), экспериментальные и исходные данные. Результаты занести в табл. 2.2.

15. Сравнить полученное значение конечной температуры капли  $T_{кон}$  со справочными значениями температур воспламенения  $T_g$  и самовоспламенения  $T_{св}$  материала.

16. Построить графики зависимости от диаметра капли времени зажигания  $t_{заж} = f(d_k)$  и энергии зажигания  $W = f(d_k)$ .

17. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 2.2 – Экспериментальные и расчетные данные

№ п/п	Диаметр капли $d_k$ , м	Время зажигания $t_{заж}$ , с	Конечная температура капли $T_{кон}$ , К	Энергия зажигания $W$ , Дж
1.				
2.				
...				

### 2.2.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Исходные данные.
4. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных (табл. 2.2), в том числе расчетные формулы.
5. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

## 2.2.6. Контрольные вопросы

1. Назовите, к какому виду работ относится электродуговая сварка.
2. Перечислите способы обеспечения пожаровзрывобезопасности при подготовке оборудования к проведению огневых ремонтных работ.
3. Объясните, чем определяется пожарная опасность на местах электродуговой сварки.
4. Напишите формулу для определения количества теплоты, которое капля металла способна отдать горючему материалу в процессе остывании до температуры самовоспламенения материала.
5. Поясните порядок проведения эксперимента.
6. Приведите примеры расчетов, в которых используются найденные экспериментально характеристики.
7. Дайте характеристику испытуемым горючим материалам (физико-химические и пожароопасные свойства, средства тушения, область применения, воздействие на организм человека продуктов горения и термического разложения материала).

### 3. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА

Пожар может быстро распространиться по производственному помещению и территории наружной установки, если для этого имеются определенные условия, к которым относятся:

- наличие большого количества горючих веществ и материалов;
- позднее обнаружение пожара и сообщение о нем;
- отсутствие или неисправность стационарных и первичных средств пожаротушения;
- неправильные действия персонала при обнаружении пожара;
- разветвленная цепь транспортных коммуникаций, связывающая в единое целое технологические установки, производственные помещения, здания или сооружения, по которым могут распространяться огонь и раскаленные продукты горения;
- внезапное появление факторов, ускоряющих его развитие (выход горючих веществ из поврежденного оборудования, разрушение аппаратов при взрыве).

Основные способы предотвращения распространения пожара на производстве:

- ограничение количества горючих веществ, обращающихся в производстве, на стадиях его проектирования и эксплуатации;
- защита производственных коммуникаций от распространения огня и раскаленных продуктов горения;
- защита технологического оборудования от разрушения при взрыве мембранными устройствами [13].

### 3.1. Исследование противопожарных мембран

Взрывное повышение давления технологической среды внутри оборудования – одна из наиболее опасных аварийных ситуаций, предшествующих или сопутствующих пожару. Физическая сущность взрыва – образование в локальной области зоны повышенного давления с последующим распространением по окружающей среде со сверхзвуковой скоростью взрывной волны, представляющей собой скачок давления, плотности, температуры и скорости среды. Максимальное давление взрыва может превышать начальное в 8–10 раз.

При взрыве создаются условия для быстрого распространения пожара в результате выброса горящего содержимого аппарата в производственном цехе или на открытой площадке, повреждения осколками соседнего технологического оборудования, разрушающего действия ударной волны. Разрушение аппаратов при взрыве часто приводит к гибели людей, оказавшихся в зоне поражения опасными факторами. Поэтому защита технологического оборудования от взрыва позволяет обеспечить взрывобезопасность всего производства.

Сброс взрывного повышения давления для защиты технологического оборудования осуществляется через мембранные предохранительные устройства (мембраны). Чтобы такая взрывозащита была достаточно надежной, необходимо выполнить два условия: обеспечить срабатывание предохранительных устройств при заданном давлении и их достаточную пропускную способность. Поэтому выбор предохранительных устройств и расчет их основных характеристик являются очень ответственными этапами проектирования оборудования [13].

**Цель лабораторной работы:** исследование эффективности средств взрывозащиты на примере разрывной предохранительной мембраны.

### 3.1.1. Краткие теоретические сведения

Предохранительные мембраны являются самыми надежными из всех существующих в настоящее время средств взрывозащиты технологического оборудования. Они меньше других устройств подвержены влиянию кристаллизации, полимеризации среды (в известных пределах), обеспечивают полную герметичность оборудования (до срабатывания), не имеют ограничений по пропускной способности [13].

Материал мембран подбирают с учетом характера изменения нагрузок на мембрану и химической активности среды в защищаемом аппарате или трубопроводе.

Разрывные мембраны при срабатывании разрываются, поэтому их чаще изготавливают в виде тонкой пластины, плоской или вогнутой, из пластичных металлов: алюминия, никеля, меди, латуни и др.

Предохранительная мембрана должна быть самым слабым узлом в конструкции оборудования, не должна срабатывать при нормальных условиях эксплуатации оборудования, а при неуправляемом повышении давления в аппарате она должна разрушаться в первую очередь.

При нагружении плоской мембраны из тонколистового проката пластичного металла перепадом давлений она приобретает форму сферического купола. Непосредственно перед разрывом мембрана работает как тонкостенная сферическая оболочка (радиус  $R$  и толщина  $\Delta$ ), защемленная по контуру (диаметр  $D$ ) (рис. 3.1).

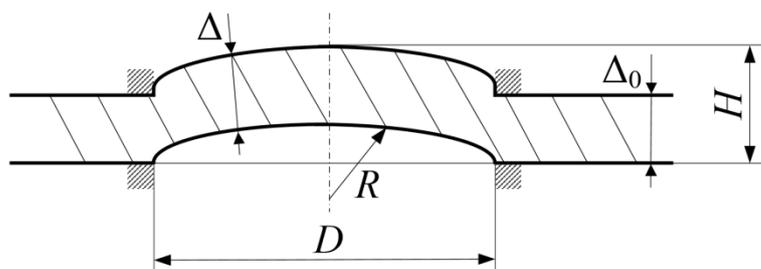


Рисунок 3.1 – Расчетная схема разрывной мембраны

Давление срабатывания такой оболочки – мембраны  $p_c$  можно определить по формуле:

$$p_c = \frac{8\Delta_0\sigma_{ep}}{D} \sqrt{\frac{\sqrt{1+\delta}-1}{1+\delta}}, \text{ кПа}, \quad (3.1)$$

где  $\Delta_0$  – толщина мембраны при срабатывании, мм;

$\sigma_{ep}$  – временное сопротивление (предел временной прочности материала мембраны при растяжении), кПа;

$D$  – диаметр мембраны, мм;

$\delta$  – относительное удлинение материала мембраны при разрыве [17].

Очевидно, при менее пластичном материале мембраны – меньшем  $\delta$  (при всех прочих равных условиях) разрушение мембраны произойдет при меньшем давлении  $p_c$ .

Толщину проката  $\Delta_0$  для изготовления мембраны можно рассчитать по формуле:

$$\Delta_0 = \frac{p_c D}{8k_t \sigma_{ep}} \sqrt{\frac{1+\delta}{\sqrt{1+\delta}-1}}, \text{ мм}, \quad (3.2)$$

где  $k_t$  – температурный поправочный коэффициент, зависящий от материала мембраны и рабочей температуры в защищаемом аппарате.

Давление срабатывания  $p_c$  мембраны не должно быть больше расчетного избыточного давления взрыва  $\Delta p$  и меньше рабочего давления аппарата. Если защищаемый аппарат постоянно сообщается с атмосферой, то есть работает с атмосферным давлением, то границу нижнего диапазона можно не устанавливать, а указать лишь максимально допустимое значение:

$$p_c \leq \Delta p. \quad (3.3)$$

Избыточное давление взрыва  $\Delta p$  при сгорании газо-, паровоздушной смеси, состоящей из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, J, F, на которое рассчитана мембрана, определяется в соответствии в [6] по формуле:

$$\Delta p = (p_{max} - p_0) \frac{mZ}{V_{св} \rho_{z(n)}} \cdot \frac{100}{C_{ст}} \cdot \frac{1}{K_n}, \text{ кПа}, \quad (3.4)$$

где  $p_{max}$  – максимальное давление взрыва стехиометрической газовой или паровой смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным. При отсутствии данных допускается принимать  $p_{max} = 900$  кПа;

$p_0$  – атмосферное давление (допускается принимать  $p_0 = 101$  кПа);

$m$  – масса горючих веществ, вышедших в результате расчетной аварии в помещение, кг;

$Z$  – коэффициент участия горючего во взрыве, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения. Допускается принимать значение  $Z$ :

для водорода  $Z = 1$ ;

для горючих газов (кроме водорода)  $Z = 0,5$ ;

для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, нагретых до температуры вспышки и выше,  $Z = 0,3$ ;

для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, нагретых ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля  $Z = 0,3$ ;

для легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, нагретых ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоля  $Z = 0$ ;

$V_{св}$  – свободный объем аппарата, м<sup>3</sup>;

$\rho_{г(п)}$  – плотность газа или пара при расчетной температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$C_{ст}$  – стехиометрическая концентрация горючих газов или паров легковоспламеняющихся жидкостей и горючих жидкостей, % об;

$K_n$  – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать  $K_n = 3$ .

Величина плотности газа (пара) при расчетной температуре вычисляется по формуле:

$$\rho_{z(n)} = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367 \cdot t_p)}, \quad (3.5)$$

где  $V_0 = 22,413$  – мольный объем, м<sup>3</sup>/кмоль;

$M$  – молярная масса, кг/кмоль;

$t_p$  – расчетная температура, °С.

Значение стехиометрической концентрации для индивидуальных газов или паров определяется по выражению:

$$C_{cm} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta}, \quad (3.6)$$

где  $\beta = n_C + \frac{n_H - n_X}{4} - \frac{n_O}{2}$  – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания;

$n_C, n_H, n_O, n_X$  – число атомов соответственно углерода, водорода, кислорода и галоидов в молекуле горючего.

Для смеси горючих газов или паров значение  $C_{cm}$  может быть найдено на основании формулы Ле Шателье [19]:

$$C_{cm} = \frac{100}{\frac{\varphi_1}{C_{cm1}} + \frac{\varphi_2}{C_{cm2}} + \frac{\varphi_3}{C_{cm3}} + \dots}, \quad (3.7)$$

где  $C_{cm_i}$  – стехиометрическая концентрация для каждого компонента смеси, вычисляемая по формуле (3.6), % об.;

$\varphi_i$  – объемная концентрация каждого компонента в смеси, % об.

### **3.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с горючими газами.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением.

4. Эксперимент, описанный в лабораторной работе, проводится на открытом воздухе, вне помещений учебного корпуса.

5. При проведении эксперимента установку для испытания противовзрывных мембран следует устанавливать за специальным защитным экраном, обеспечивающим безопасность обучающихся (рис. 3.2, г). При этом лабораторная установка располагается таким образом, чтобы волна взрыва была направлена в противоположную от защитного экрана сторону, как показано на рис. 3.2, г.

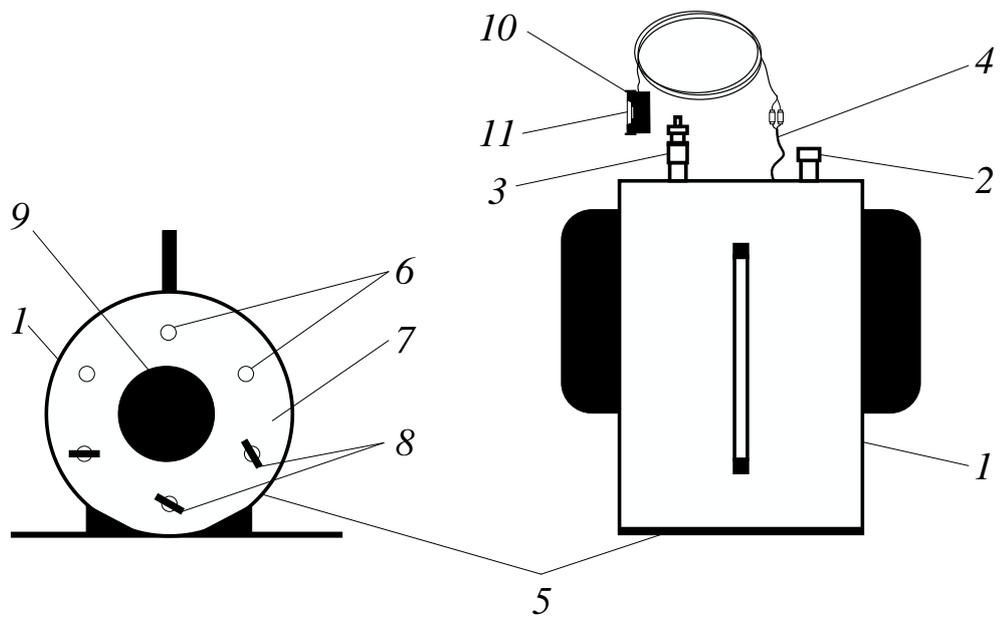
6. При выполнении лабораторной работы возможно воздействие на обучающихся следующих опасных и вредных производственных факторов:

- термические ожоги при нагревании различных физических тел;
- порезы рук при небрежном обращении с лабораторной посудой и установкой;
- возникновение пожара при неаккуратном обращении с горючими газами.

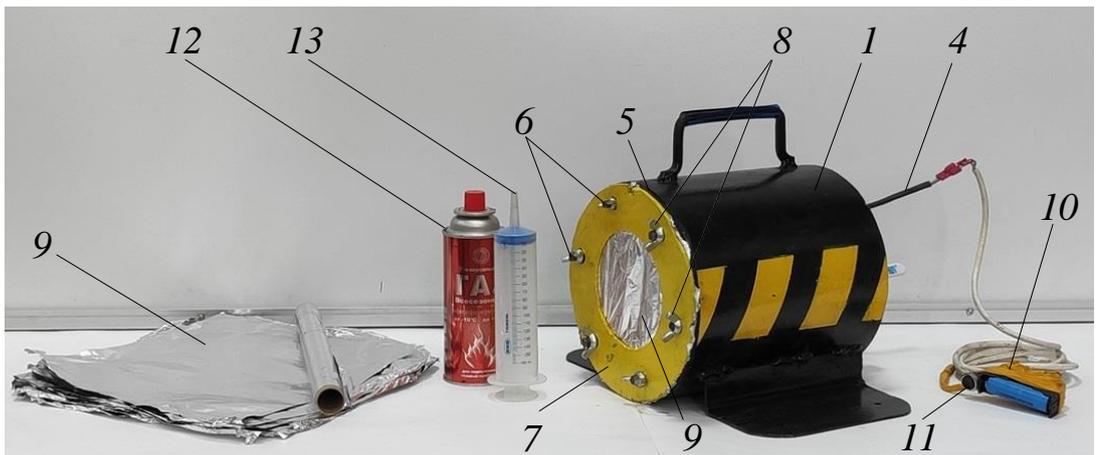
Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

### **3.1.3. Лабораторная установка**

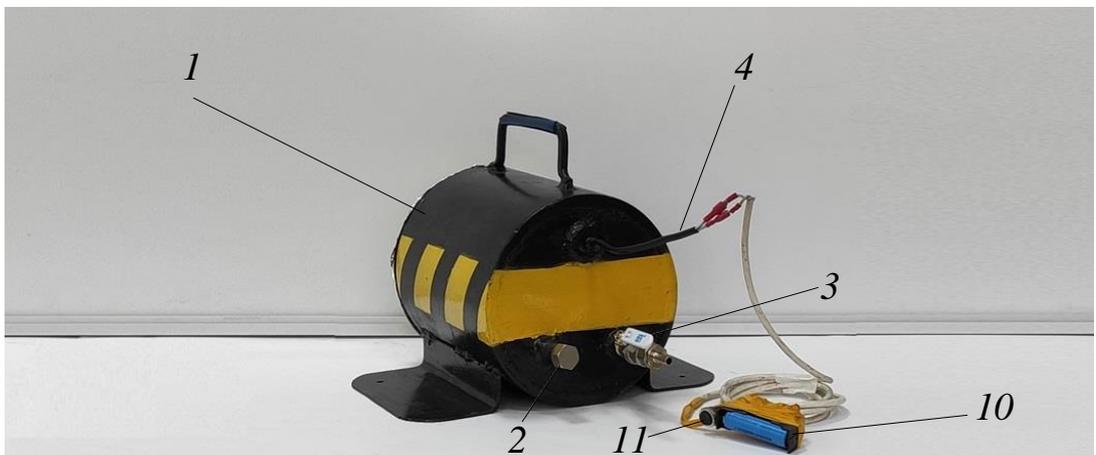
На рис. 3.2 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования предохранительных противовзрывных мембран. Установка позволяет проводить испытания мембран из различных материалов при определенных значениях давления взрыва в аппарате.



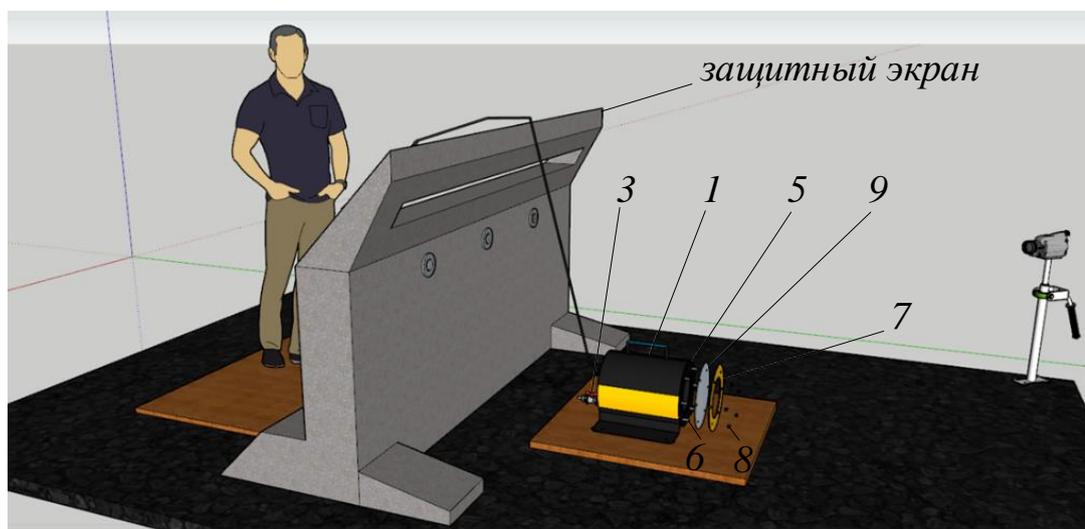
a



б



б



г

Рисунок 3.2 – Схема лабораторной установки для испытания разрывных мембран

*а* – принципиальная схема;

*б* – общий вид (фронтальная сторона); *в* – общий вид (тыльная сторона);

*г* – схема расположения установки:

- 1 – корпус установки; 2 – заглушка технологического отверстия;  
 3 – кран со штуцером; 4 – высоковольтный провод; 5 – крепежный элемент;  
 6 – шпильки; 7 – зажимное кольцо; 8 – барашковые гайки; 9 – мембрана;  
 10 – пульт дистанционной подачи искры; 11 – кнопка замыкания цепи;  
 12 – баллон с горючей газовой смесью; 13 – шприц

Установка представляет собой полу цилиндрическую камеру сгорания объемом  $V_{св} = 0,007065 \text{ м}^3$ , изготовленную из газового баллона, к торцевым частям которого приварены стенки. Тыльная сторона корпуса 1 имеет технологическое отверстие, закрытое заглушкой 2, кран со штуцером 3 для подачи газа, отверстие для ввода высоковольтного провода 4 в камеру сгорания. С фронтальной стороны корпуса приварен крепежный элемент 5 с шестью шпильками 6. Для крепления мембраны 9 на установку при испытаниях, изготовлено зажимное кольцо 7, притягиваемое к крепежному элементу 5 барашковыми гайками 8. Герметичность камеры обеспечивается резиновой прокладкой, расположенной между крепежным элементом 5 и кольцом 7. Для устойчивости конструкции смонтированы ножки с просверленными в них отверстиями, которые дают возможность жесткого крепежа установки на конструкции. Подача искры в камеру сгорания для

безопасности испытателя осуществляется дистанционно с пульта 10, состоящего из аккумуляторного отсека, аккумулятора, генератора высоковольтных импульсов, съемного провода и кнопки замыкания цепи 11.

Перед проведением эксперимента необходимо компрессором продуть камеру сгорания для удаления остатков газовой смеси, оставшейся после предыдущих опытов.

[Видеоматериал](#), иллюстрирующий последовательность проведения натурального эксперимента с использованием лабораторной установки (рис. 3.2), доступен по ссылке, представленной в виде QR-кода.



Для исследования эффективности предохранительных мембран в рамках лабораторной работы необходимо провести несколько экспериментов, в ходе которых фиксируется срабатывание (разрыв) мембраны при взрыве газовой смеси в камере сгорания установки при различных значениях давления взрыва и толщине мембраны.

Исходными данными для проведения эксперимента и выполнения расчетов являются:

1. Испытуемый материал мембраны:
  - наименование (задается преподавателем);
  - механические свойства материала (указаны в приложении Д);
  - толщина 1 слоя материала (задается преподавателем);
  - количество слоев материала мембраны при проведении экспериментов (задается преподавателем в диапазоне 20-35 в зависимости от толщины материала).
2. Состав горючей газовой смеси (задается преподавателем).
3. Параметры, необходимые для расчета избыточного давления взрыва (указаны в приложении Д)
4. Расчетная температура (комнатная) (определяется измерением).

### 3.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретические сведения.

2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.

3. Разделиться на три подгруппы для проведения эксперимента. Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.

4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента (характеристики испытуемого материала мембраны), материал для изготовления испытуемой мембраны (пищевая фольга), горючую газовую смесь (бытовой газ: 9 % об. пропан, 16 % об. бутан, 74 % об. изобутан), дополнительное лабораторное оборудование (термометр, шприц объемом 160 мл, компрессор; редуктор давления).

5. В журнал проведения испытаний (приложение Д) записать исходные данные, используя предварительные измерения и расчеты.

6. Определить молярную массу  $M$  испытуемой газовой смеси с учетом объемной концентрации компонентов. По формуле (3.5) определить плотность испытуемой газовой смеси  $\rho_{z(n)}$  при расчетной температуре  $t_p$ .

7. Составить реакции горения для компонентов испытуемой газовой смеси. Определить стехиометрические коэффициенты  $\beta_i$  для компонентов газовой смеси. Используя выражение (3.6), найти стехиометрические концентрации  $C_{cm_i}$  для компонентов газовой смеси. По формуле (3.7) вычислить стехиометрическую концентрацию  $C_{cm}$  газовой смеси. Составив пропорцию, определить объем газовой смеси  $V_{cm}$ , необходимый для создания стехиометрической концентрации в камере объемом  $V_{св}$ . Определить массу газовой смеси  $m = \rho_{z(n)} \cdot V_{cm}$ , необходимой для создания стехиометрической концентрации в камере. Результаты занести в табл. 3.1.

8. На основании выражения (3.4) рассчитать избыточное давление взрыва  $\Delta p$ . Результаты занести в табл. 3.1.

9. На основании выражения (3.1) рассчитать давление срабатывания  $p_c$  мембраны для заданного количества слоев фольги  $n_1$  и  $n_2$ . Результаты занести в табл. 3.1.

10. Провести эксперимент №1 «Испытание мембраны из фольги в  $n_1$  слоев» в следующем порядке:

10.1. Продуть камеру сгорания установки при помощи компрессора или оставить на открытом воздухе в течении 5 минут.

10.2. Проверить работоспособность пульта дистанционной подачи искры 10, нажав на кнопку замыкания цепи 11.

10.3. Надеть мембрану 9, состоящую из заданного количества слоев фольги, на крепежный элемент 5.

10.4. Для фиксации мембраны 9 притянуть зажимное кольцо 7 к корпусу установки, прикрутив барашковые гайки 8 к шпилькам 6 крепежного элемента 5.

10.5. В вытяжном шкафу набрать в шприц 13 нужный объем газа  $V_{cm}$  из баллона 12.

10.6. Открутить заглушку 2 технологического отверстия, открыть кран 3.

10.7. Через кран 3 закачать шприцем 13 газ в камеру сгорания.

10.8. Закрыть кран 3, закрыть технологическое отверстие заглушкой 2.

10.9. Взяв за ручку, перенести лабораторную установку на место ее использования. Встряхнуть камеру для равномерного распределения газа по всему объему камеры.

10.10. Подсоединить пульт дистанционной подачи искры 10 к выводам высоковольтного провода 4.

10.11. Взяв пульт 10, отойти в безопасную от взрыва зону.

10.12. Нажать кнопку замыкания цепи *11* на пульте *10* и удерживать ее в течение 10 с или до возникновения «хлопка», свидетельствующего об инициализации реакции горения газа.

10.13. Зафиксировать в табл. 3.1 факт срабатывания (разрыва) мембраны («+» – сработала, «-» – не сработала).

10.14. Дважды повторить эксперимент (пп. 10.1-10.13).

11. Провести эксперимент №2 «Испытание мембраны из фольги в  $n_2$  слоев», повторив пп. 10.1-10.14.

13. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 3.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Эксперимент	Число слоев материала $n$	Объем газа $V_{ст}$ , м <sup>3</sup>	Масса газа $m$ , кг	Расчетное избыточное давление взрыва $\Delta p$ , кПа	Расчетное давление срабатывания мембраны $p_c$ , кПа	Срабатывание мембраны
№1						
№2						

### 3.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Исходные данные.
4. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных (табл. 3.1), в том числе расчетные формулы.
5. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

### **3.1.6. Контрольные вопросы**

1. Напишите формулу, по которой определяется избыточное давление взрыва при сгорании газо-, паровоздушной смеси, состоящей из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, J, F.

2. Назовите параметры, от которых зависит величина давления взрыва.

3. Объясните, для чего в технологическом оборудовании применяют предохранительные мембраны.

4. Приведите классификацию предохранительных мембран.

5. Перечислите, в каких случаях в технологическом оборудовании применяют разрывные мембраны.

## **4. ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ТИПОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

### **4.1. Исследование пожарной опасности теплообменных процессов**

Нагревание горючих веществ необходимо для ускорения многих химических реакций, осуществления процессов перегонки, сушки, плавления, выпаривания и т.д., охлаждение – для конденсации веществ, разделения веществ с низкой температурой кипения, сушки, а также для хранения веществ (холодильники). Вещества, используемые для нагревания других веществ, называют теплоносителями, а вещества, используемые для охлаждения других веществ – хладоносителями.

В технологических процессах наиболее часто нагрев осуществляют: пламенем и топочными газами, водяным паром, высокотемпературными теплоносителями, промежуточными и конечными горячими продуктами производства, горячей водой, нагретым воздухом, электрической энергией. Часто применяемые хладоносители и хладагенты: вода, рассолы, фреоны, аммиак, пропан, холодные отходящие продукты производства, атмосферный воздух.

Пожарная опасность оборудования для нагревания или охлаждения горючих веществ определяется пожароопасными свойствами нагреваемых (охлаждаемых) веществ, способом нагрева или охлаждения, рабочей температурой [13]. Наиболее опасным сценарием развития пожароопасной ситуации является выход горючих жидкостей из теплообменных аппаратов в объем помещения при частичной или полной разгерметизации оборудования.

**Цель лабораторной работы:** исследование теплообменных процессов в промышленных аппаратах.

#### 4.1.1. Краткие теоретические сведения

Теплообменными аппаратами называют устройства, предназначенные для обмена теплотой между греющей и обогреваемой рабочей средой. Последние принято называть теплоносителями [18].

По принципу действия теплообменные аппараты могут быть: рекуперативные, регенеративные и смешительные.

Рекуперативными называются такие аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку.

Регенеративными называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается то горячим, то холодным теплоносителем. При протекании горячей жидкости тепло воспринимается стенками аппарата и в них аккумулируется, при протекании холодной жидкости это аккумулированное тепло ею воспринимается.

В смешительных аппаратах процесс теплопередачи происходит путем непосредственного соприкосновения и смешения горячего и холодного теплоносителей. В этом случае теплопередача протекает одновременно с материальным обменом.

Процесс теплообмена между средами может происходить через трубчатую, плоскую или иную поверхность (рис. 4.1) [18].

Пластинчатый теплообменник (рис. 4.1, а) – один из видов рекуперативных теплообменных аппаратов, в основе работы которого лежит теплообмен между двумя средами через контактную пластину без смешения. Пластинчатые теплообменные аппараты применяют для охлаждения и нагревания жидкостей, конденсации чистых паров и паров из парогазовых смесей, а также в качестве греющих камер выпарных аппаратов.

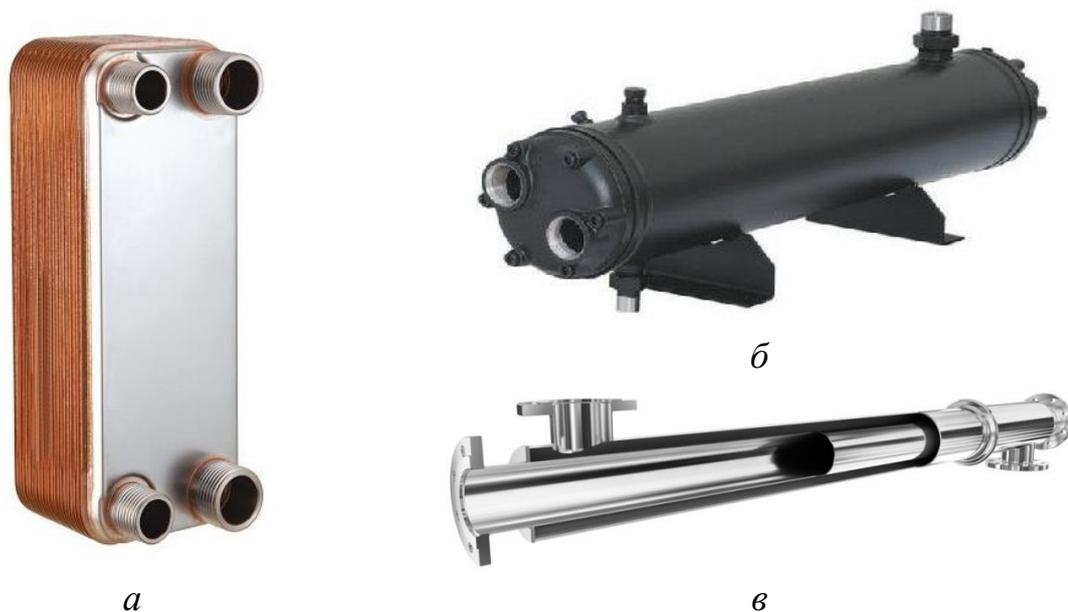


Рисунок 4.1 – Теплообменные аппараты  
*а* – пластинчатый; *б* – кожухотрубный; *в* – типа «труба в трубе»

Принцип работы пластинчатых теплообменных аппаратов следующий:

1. На входы теплообменного аппарата подаются теплоносители.
2. Теплоносители движутся по внутреннему контуру теплообменника, который сформирован пакетом пластин.

3. В процессе движения, контактируя с поверхностью пластины, более горячий теплоноситель отдает часть тепла нагреваемой среде.

4. С выходов теплообменника теплоносители с изменившейся температурой поступают в систему отопления, водоснабжения или вентиляции.

Пластинчатые теплообменники имеют щелевидные каналы, образованные параллельными пластинками. Для интенсификации теплообмена и повышения компактности, пластинам при изготовлении придают различные профили, а между плоскими пластинами помещают профилированные вставки.

Кожухотрубчатые теплообменники (рис. 4.1, б) применяют для теплообмена и термохимических процессов между различными жидкостями, парами и газами как без изменения, так и с изменением их агрегатного состояния.

Кожух (корпус) кожухотрубчатого теплообменника представляет собой трубу, сваренную из одного или нескольких стальных листов. Кожухи различаются главным образом способом соединения с трубной доской и крышками. Толщина стенки кожуха определяется давлением рабочей среды и его диаметром. К цилиндрическим кромкам кожуха приваривают фланцы для соединения с крышками или днищами. На наружной поверхности кожуха прикрепляют опоры аппарата.

Трубчатка кожухотрубчатых теплообменников выполняется из прямых или изогнутых (U-образных или W-образных) труб. В кожухотрубчатых теплообменниках проходное сечение межтрубного пространства в 2-3 раза больше проходного сечения внутри труб. Поэтому при равных расходах теплоносителей с одинаковым фазовым состоянием коэффициенты теплоотдачи на поверхности межтрубного пространства невысоки, что снижает общий коэффициент теплопередачи в аппарате. Устройство перегородок в межтрубном пространстве такого теплообменника способствует увеличению скорости теплоносителя и повышению эффективности теплообмена.

Теплообменник типа «труба в трубе» (рис. 4.1, в) служит для нагревания или охлаждения теплоносителя в системах отопительного и промышленного типа. Данные аппараты используются также в нефтегазовой, химической и других отраслях промышленности. Для удобства чистки и замены внутренние трубы обычно соединяют между собой «калачами» или коленами. Двухтрубные теплообменники, имеющие значительную поверхность нагрева, состоят из ряда секций, параллельно соединенных коллекторами. Если одним из теплоносителей является насыщенный пар, то его, как правило, направляют в межтрубное (кольцевое) пространство. Такие теплообменники часто применяют как жидкостные или газожидкостные. Подбором диаметров внутренней и наружной труб можно обеспечить обеим рабочим средам, участвующим в теплообмене, необходимую скорость для достижения высокой интенсивности теплообмена. Преимуществом

теплообменников типа «труба в трубе» является высоким коэффициент теплоотдачи, а также пригодность для нагрева или охлаждения сред при высоком давлении.

Конструкции теплообменных аппаратов весьма разнообразны, однако существует общая методика теплотехнических расчетов, которую можно применить для частных расчетов в зависимости от имеющихся исходных данных. Применяются два вида теплового расчета теплообменных аппаратов: конструктивный (проектный) и поверочный. Оба расчета идентичны и, по сути, являются взаимнообратными.

Конструктивный расчет выполняется при проектировании теплообменного аппарата, когда заданы теплопроизводительность аппарата, теплоносители, их расходы и параметры. Целью такого расчета является определение поверхности теплообмена и конструктивных размеров выбранного типа аппарата.

Поверочный расчет производится для установления возможности применения имеющихся или стандартных теплообменных аппаратов для необходимых технологических процессов. При таком расчете заданы размеры аппарата и условия его работы; требуется определить конечные параметры теплоносителей и теплопроизводительность аппарата. Следовательно, целью расчета является выбор условий, обеспечивающих оптимальный режим работы аппарата. В некоторых случаях при таком расчете теплопроизводительность аппарата является заданной, а требуется определить, например, расход и начальную температуру одной из сред.

Основой для конструктивного и поверочного расчетов теплообменников являются уравнения теплопередачи и теплового баланса. Вид уравнений конкретизируется в зависимости от типа теплообменника [18].

Уравнение теплопередачи для рекуперативного теплообменника имеет следующий вид:

$$Q = F \cdot k \cdot \Delta t_{cp}, \quad (4.1)$$

где  $Q$  – количество передаваемой в единицу времени теплоты от горячего теплоносителя холодному (мощность теплообменного аппарата), кВт;

$F$  – площадь рабочей поверхности теплообменника, м<sup>2</sup>;

$k$  – коэффициент передачи тепла (расчетная величина, зависящая от формы и размеров поверхности, от ее физических свойств и от условий теплообмена на поверхностях теплообменника), кВт/(м<sup>2</sup>·°С);

$\Delta t_{cp}$  – средняя разность между температурами теплоносителей на входе в аппарат и на выходе из него (температурный напор), °С.

Если нагрев одного из теплоносителей происходит за счет охлаждения другого, т.е. аппарат работает без изменения агрегатного (фазового) состояния теплоносителей, то уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q = G_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) = G_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2); \quad (4.2)$$

где  $G_1$  и  $G_2$  – массовые расходы горячего и холодного теплоносителя соответственно, кг/с;

$c_{p1}$  и  $c_{p2}$  – удельные теплоемкости горячего и холодного теплоносителей, кДж/(кг·°С);

$t'_1$ ,  $t'_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в аппарат, °С;

$t''_1$ ,  $t''_2$  – температуры горячего и холодного теплоносителей на выходе из аппарата, °С.

Уравнение теплового баланса (4.2) справедливо для идеального теплообменника при отсутствии тепловых потерь от стенок аппарата в окружающую среду. Тепловые потери изолированных теплообменников пропорциональны площади их наружной поверхности и ограничены предельно допустимой температурой. Для компактных конструкций величина тепловых потерь не достигает 1 %.

#### **4.1.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с электрооборудованием.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением 220 В.

4. Запрещается касаться нагревающихся в ходе эксперимента элементов лабораторной установки до их остывания.

5. Не допускается попадание влаги на контакты разъемов и внутренних элементов установки.

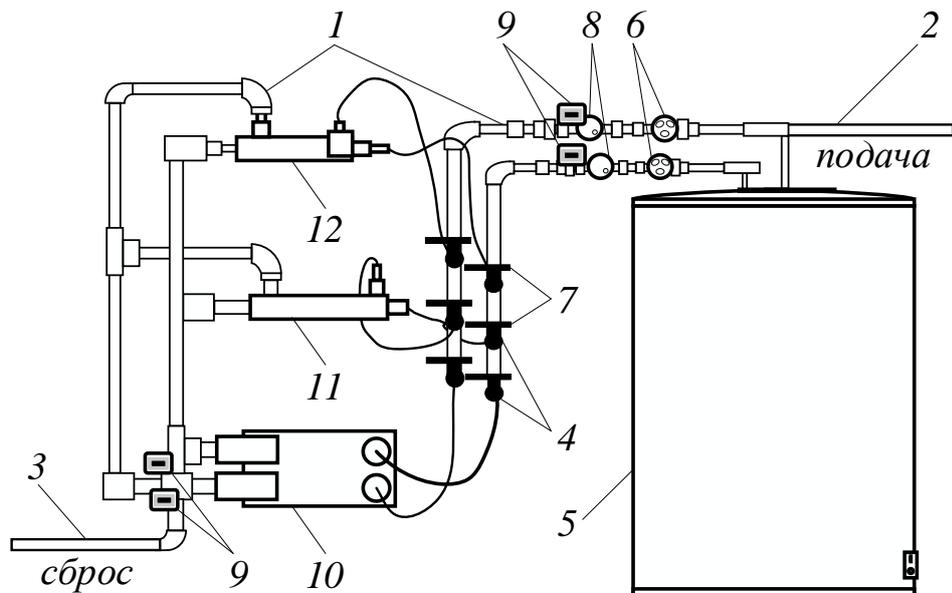
6. При выполнении лабораторной работы возможно воздействие на обучающихся следующих опасных и вредных производственных факторов:

- термические ожоги при нагревании теплоносителя и элементов установки;
- поражение электрическим током при работе с электроустановками.

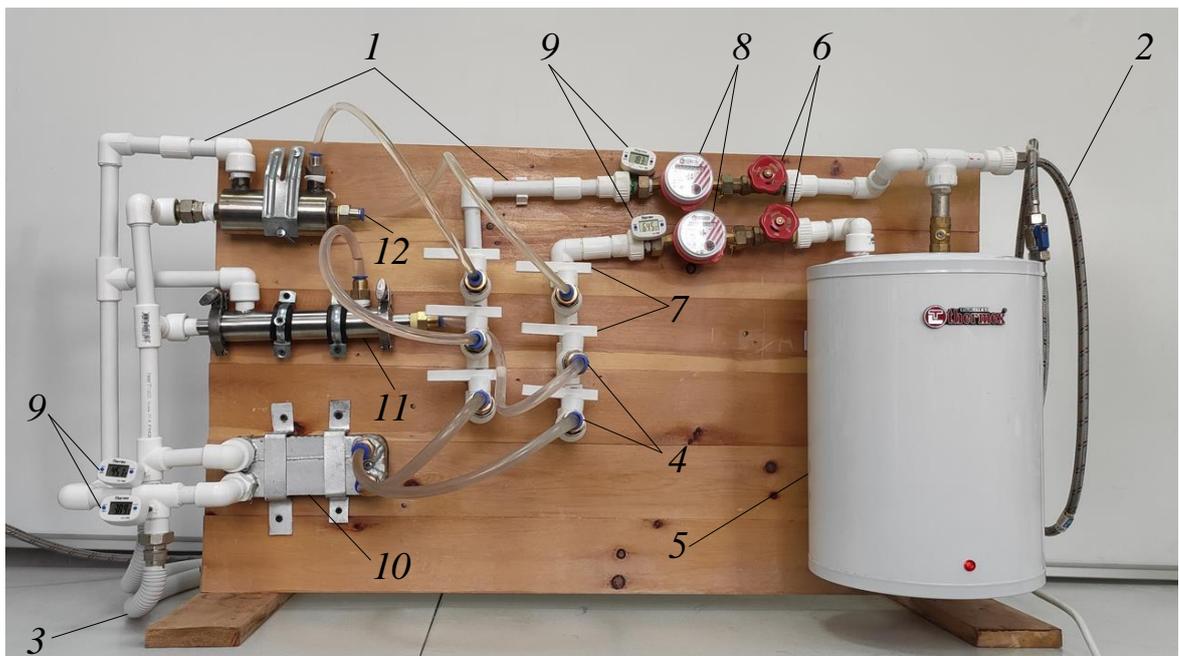
Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

#### **4.1.3. Лабораторная установка**

На рис. 4.2 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования теплообменных процессов. Установка позволяет фиксировать изменение температуры теплоносителя (воды) на входе и на выходе пластинчатого, кожухотрубчатого теплообменника, а также теплообменника типа «труба в трубе» при различных значениях расхода горячего и холодного теплоносителей.



*a*



*б*

Рисунок 4.2 – Схема лабораторной установки для исследования теплообменных процессов

*a* – принципиальная схема; *б* – общий вид:

1 – полипропиленовые трубы; 2 – соединительная подводка; 3 – шланги;

4 – быстросъемные штуцеры; 5 – водонагреватель;

6 – задвижки клиновые; 7 – краны шаровые;

8 – счетчики горячей и холодной воды; 9 – цифровые термометры;

10 – пластинчатый теплообменник;

11 – кожухотрубчатый теплообменник;

12 – теплообменник типа «труба в трубе»

Установка представляет собой теплообменный аппарат, элементы которого закреплены на деревянном корпусе с подставкой. Наполнение водонагревателя 5 теплоносителем (водой) из системы водоснабжения осуществляется через соединительную металлическую подводку 2, слив воды из аппарата в канализацию – через шланги 3. Заполнение горячей и холодной водой внутреннего объема теплообменников 10-12 выполняется через шаровые краны 7 по трубкам ПВХ, присоединенным быстросъемными штуцерами 4. Водяные счетчики 8 предназначены для фиксации объемного расхода воды, регулируемого задвижками 6. Для отслеживания изменения температуры воды при прохождении через теплообменники 10-12 предусмотрены цифровые термометры 9, фиксирующие температуры горячего и холодного теплоносителей на входе в аппарат и выходе из него.

[Видеоматериал](#), иллюстрирующий последовательность проведения натурального эксперимента с использованием лабораторной установки (рис. 4.2), доступен по ссылке, представленной в виде QR-кода.



Для исследования теплообменных процессов в рамках лабораторной работы необходимо провести несколько экспериментов, в ходе которых регистрируется изменение температуры теплоносителя при заданном значении расхода горячей и холодной воды для теплообменников различного типа.

Исходными данными для проведения эксперимента и выполнения расчетов являются:

1. Температура горячего теплоносителя  $t_1'$  на входе в аппарат (задается преподавателем).
2. Объемные расходы горячего  $G_{V1}$  и холодного  $G_{V2}$  теплоносителей (приблизительные значения задаются преподавателем).
3. Физические свойства теплоносителя (воды) (указаны в приложении Л).

#### 4.1.4. Порядок выполнения лабораторной работы

1. Изучить теоретические сведения.

2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.

3. Разделиться на четыре подгруппы для проведения эксперимента.

Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.

4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента (температура горячего теплоносителя  $t'_1$  на входе в аппарат, приблизительные объемные расходы горячего  $G_{V1}$  и холодного  $G_{V2}$  теплоносителей) и дополнительное лабораторное оборудование (секундомер).

5. В журнал проведения испытаний (приложение Е) записать исходные данные.

6. Провести эксперимент №1 «Исследование эффективности пластинчатого теплообменника» в следующем порядке:

6.1. Подключить соединительную подводку 2 к системе водоснабжения.

6.2. Убедиться в подсоединении шлангов 3 к канализации.

6.3. Наполнить водонагреватель 5 водой.

6.4. Подключить водонагреватель 5 к электрической сети 220 В и включить его в режим нагрева воды до заданной температуры  $t'_1$  горячего теплоносителя.

6.5. Включить термометры 9 горячей и холодной воды на входе и выходе аппарата.

6.6. Дождаться пока вода в водонагревателе 5 нагреется до заданной температуры горячего теплоносителя  $t'_1$ .

6.7. Открыть шаровые краны 7 таким образом, чтобы происходило заполнение горячим и холодным теплоносителем пластинчатого

теплообменника 10.

6.8. Ориентируясь на показания счетчиков 8, используя секундомер, настроить с помощью клиновых задвижек 6 объемный расход  $G_{V1}$ ,  $G_{V2}$  горячего и холодного теплоносителей через теплообменник, таким образом, чтобы значение лежало в заданном преподавателем диапазоне. Фактические значения  $G_{V1}$ ,  $G_{V2}$  зафиксировать в табл. 4.1.

6.9. Через 10 секунд замерить с помощью термометров 9 температуры теплоносителей на входе в аппарат и выходе из него. Полученные значения температур горячей воды  $t_1'$ ,  $t_1''$  и холодной воды  $t_2'$ ,  $t_2''$  зафиксировать в табл. 4.1.

6.10. Закрывать шаровые краны 7.

7. Провести эксперимент №2 «Исследование эффективности кожухотрубчатого теплообменника» в следующем порядке:

7.1. Открыть шаровые краны 7 таким образом, чтобы происходило заполнение горячим и холодным теплоносителем кожухотрубчатого теплообменника 11.

7.2. Повторить пп. 6.9-6.10.

8. Провести эксперимент №3 «Исследование эффективности теплообменника типа «труба в трубе»» в следующем порядке:

7.1. Открыть шаровые краны 7 таким образом, чтобы происходило заполнение горячим и холодным теплоносителем теплообменника типа «труба в трубе» 12.

7.2. Повторить пп. 6.9-6.10.

9. Отключить электропитание водонагревателя. Отключить установку от системы водоснабжения. Слить теплоноситель из аппарата в канализацию. Закрывать шаровые краны 7 и задвижки 6.

10. Вычислить средние арифметические значения температур горячего и холодного теплоносителей:  $\bar{t}_1 = \frac{t_1' + t_1''}{2}$ ,  $\bar{t}_2 = \frac{t_2'' + t_2'}{2}$ . Результаты занести в табл. 4.1.

11. Используя справочные данные (приложение Л), определить теплоемкости  $c_{p1}$  и  $c_{p2}$  горячего и холодного теплоносителей при  $\bar{t}_1$  и  $\bar{t}_2$  соответственно.

12. Используя справочные данные (приложение Л), определить плотности  $\rho_1$  и  $\rho_2$  горячего и холодного теплоносителей при  $\bar{t}_1$  и  $\bar{t}_2$  соответственно.

13. Вычислить массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, кг/с:  $G_1 = \frac{G_{V1} \cdot \rho_1}{60}$ ,  $G_2 = \frac{G_{V2} \cdot \rho_2}{60}$ . Результаты занести в табл. 4.1.

14. На основе формулы (4.2) и экспериментальных данных рассчитать мощности теплообменных аппаратов  $Q$  и составить уравнения теплового баланса. Результаты занести в табл. 4.1. Проверить условие выполнения теплового баланса. Сделать вывод.

15. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 4.1 – Экспериментальные и расчетные данные

Эксперимент		№1	№2	№3
Вид теплообменника		пластинчатый	кожухотрубчатый	«труба в трубе»
Объемный расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /мин	горячего $G_{V1}$			
	холодного $G_{V2}$			
Массовый расход теплоносителя, кг/с	горячего $G_1$			
	холодного $G_2$			
Температура горячего теплоносителя, °С	на входе $t'_1$			
	на выходе $t''_1$			
	средняя $\bar{t}_1$			
Температура холодного теплоносителя, °С	на входе $t'_2$			
	на выходе $t''_2$			
	средняя $\bar{t}_2$			
Мощность теплообменного аппарата $Q$ , кВт				

#### **4.1.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе**

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.
3. Исходные данные.
4. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных (табл. 4.1), в том числе расчетные формулы.
5. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

#### **4.1.6. Контрольные вопросы**

1. Перечислите принципы действия теплообменных аппаратов.
2. Опишите устройство и принцип работы пластинчатых, кожухотрубных теплообменников, теплообменников типа «труба в трубе».
3. Назовите причины повреждения теплообменников и меры профилактики пожароопасных ситуаций.
4. Объясните, для чего предназначены конструктивный и поверочный расчеты теплообменных аппаратов.
5. Напишите уравнения теплового баланса теплообменного аппарата.
6. Поясните порядок проведения эксперимента.
7. Приведете примеры расчетов, в которых используются найденные экспериментально характеристики.

## **4.2. Исследование пожарной опасности типовых способов сушки сыпучих материалов**

Сушкой называется термический процесс удаления влаги из влажных материалов путем ее испарения и отвода образующихся паров.

Под влагой подразумевается любая жидкость, находящаяся в веществе, которая должна быть частично или полностью удалена. Количество влаги, выраженное в процентах, называется относительной влажностью материала. По физической сущности сушка является сложным тепломассообменным процессом, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала в окружающую среду.

Для передачи (отвода или подвода) тепла от обрабатываемых материалов с целью их сушки используется сушильный агент – среда, обладающая свойствами теплоносителя (газ, жидкость, пароводяная смесь, пар, электромагнитное поле, дымовые газы и т.д.).

Процесс, при котором сушильный агент, поглотивший пары влаги, отводится искусственным способом с помощью вентиляторов, инжекторов, дымососов, вытяжных труб и других устройств называется искусственной сушкой. Ее производят в специальных устройствах – сушилках.

Пожарная опасность сушилок характеризуется наличием горючей среды в виде больших количеств высушиваемых материалов и возможностью образования паро- и пылевоздушных горючих концентраций.

Степень опасности сушилок зависит от свойств высушиваемых материалов, конструкции сушилок, места расположения нагревательных приборов, способа подвода тепла, температурного режима и т.д.

Наиболее распространенными типами конструкций сушилок являются: камерные, туннельные, шахтные, ленточные, барабанные, вальцовые, сушилки с «кипящим слоем» [13].

**Цель лабораторной работы:** исследования пожарной опасности технологического процесса сушки сыпучих материалов в аппарате «кипящего слоя».

#### 4.2.1. Краткие теоретические сведения

Сушилки «кипящего слоя» – цилиндрические или расширяющиеся камеры, внутри которых на решетках находится в «кипящем» состоянии высушиваемый материал. Для поддержания равномерного «кипения» частиц в слое сушильный агент (горячий воздух или другой теплоноситель) подают под решетку сушилки равномерно по всей ее площади и с соответствующей скоростью, при которой частицы материала переходят во взвешенное состояние, и весь слой материала напоминает при этом кипящую жидкость. Отработанные газы (теплоноситель) очищаются от пыли в циклоне, батарейном пылеуловителе и пенном фильтре, после чего выбрасываются в атмосферу. Сушилки используются для сушки сыпучих зернистых материалов (в т.ч. семян злаковых культур, минеральных и органических солей, поливинилхлорида, полиэтилена), растворов, пастообразных материалов и т.д.

При сушке измельченных, порошковых материалов с большим содержанием пыли в сушилках «кипящего слоя» возможно образование пылевоздушных ВОК даже при нормальном режиме работы в результате как уноса большого количества пыли, так и взвихрения измельченных материалов и осевшей пыли.

Количество испаренной из материала жидкости можно найти из уравнения баланса сушки, которое имеет вид:

$$G_{вт} = G_1 - G_2, \quad (4.3)$$

где  $G_{вт}$  – количество влаги, удаляемой из материала, кг/ч;

$G_1$  – количество материала, поступающего в сушилку (производительность сушилки по сырому продукту), кг/ч;

$G_2$  – количество высушенного материала (производительность сушилки по готовому продукту), кг/ч.

Производительность сушилки по сырому продукту вычисляется по формуле:

$$G_1 = \frac{m_1}{\tau} \cdot 3600, \quad (4.4)$$

где  $m_1$  – начальная масса материала, кг;

$\tau$  – продолжительность сушки, с.

Производительность сушилки «кипящего слоя» по высушенному материалу определяется выражением:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - w_1}{100 - w_2}, \quad (4.5)$$

где  $w_1$  – начальная влажность материала, %;

$w_2$  – конечная влажность материала, %.

#### **4.2.2. Техника безопасности и пожарная безопасность при выполнении лабораторной работы**

1. Знать и соблюдать требования инструкции по технике безопасности и пожарной безопасности в лаборатории кафедры.

2. Соблюдать мероприятия техники безопасности и охраны труда при работе с электрооборудованием.

3. Запрещается касаться токоведущих частей оборудования, так как работающая установка находится под напряжением 220 В.

4. Запрещается касаться нагреваемых в ходе эксперимента элементов лабораторной установки до их остывания.

5. Запуск установки осуществлять после надежного закрепления всех элементов.

6. Замену высушенного продукта осуществлять после полной остановки вентилятора.

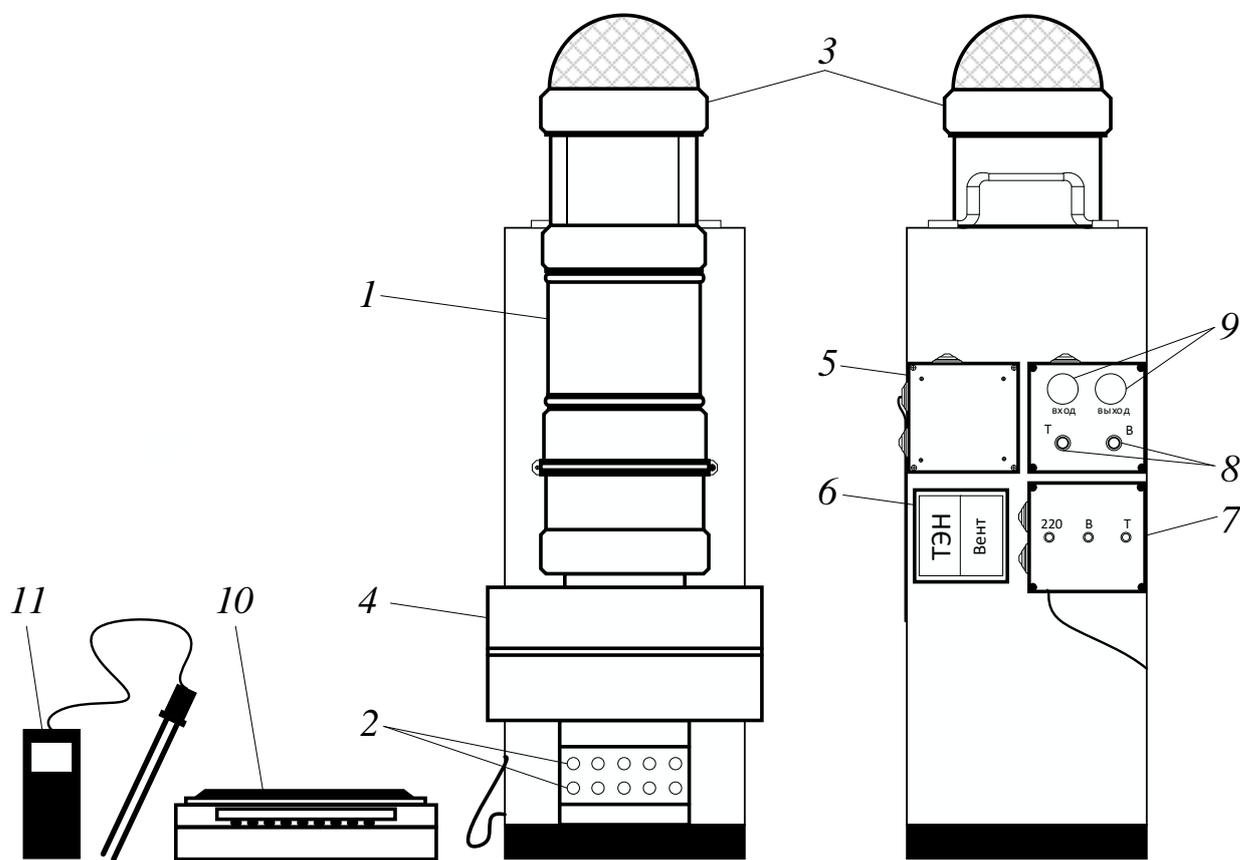
7. При выполнении лабораторной работы возможно воздействие на обучающихся следующих опасных и вредных производственных факторов:

- термические ожоги при нагревании теплоносителя и элементов установки;
- порезы рук при небрежном обращении с лабораторной посудой и приборами;
- поражение электрическим током при работе с электроустановками.

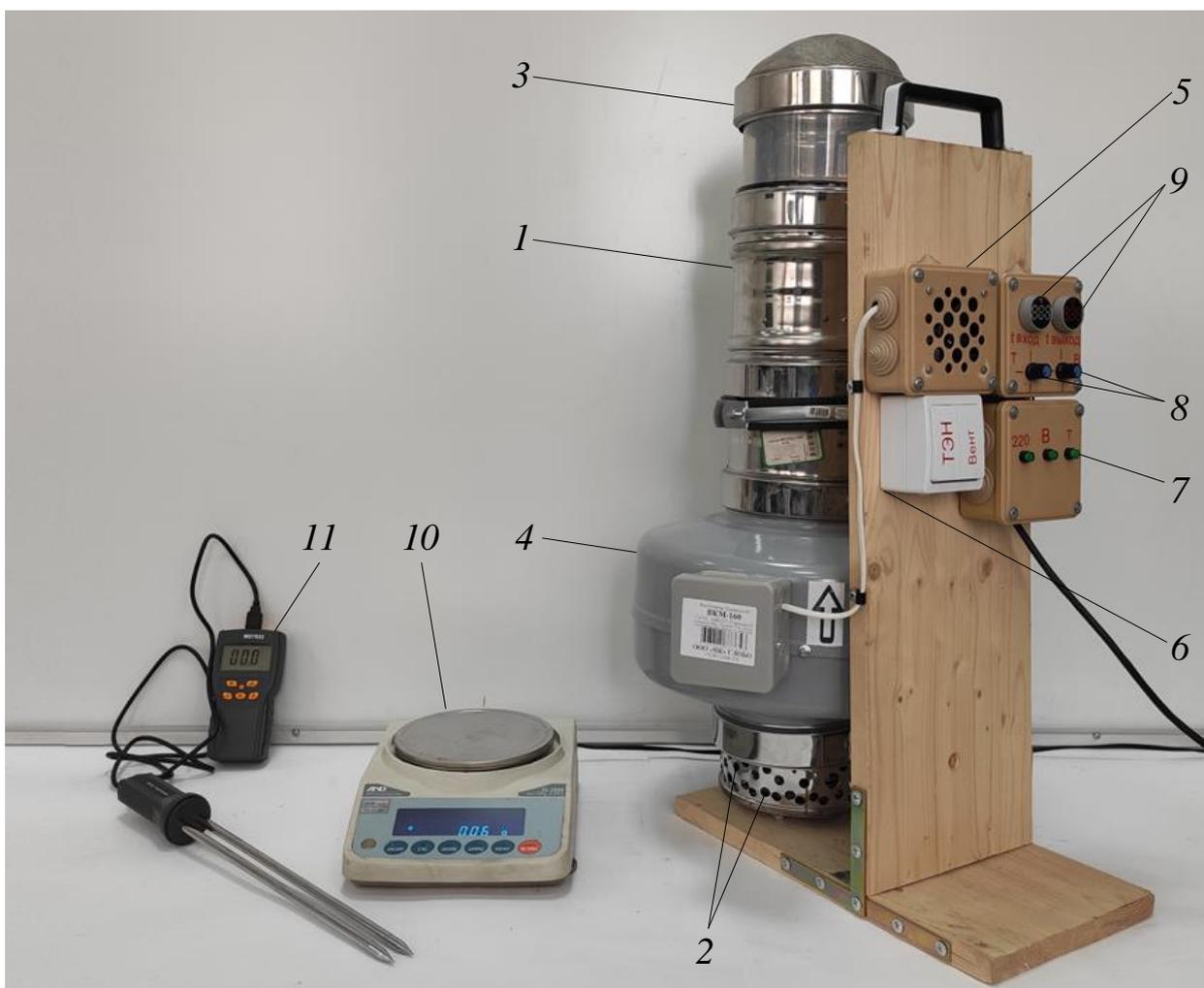
Перед началом проведения инструктажа обучающимся выдается журнал инструктажей по ТБ и ПБ, где они ставят свою подпись.

### 4.2.3. Лабораторная установка

На рис. 4.3 приведены принципиальная и общая схема лабораторной установки для исследования пожарной опасности типового способа сушки сыпучих материалов в «кипящем слое». Установка позволяет фиксировать изменение влажности материала в процессе сушки при различных значениях скорости и температуры сушильного агента.



*a*



*б*

Рисунок 4.3 – Схема лабораторной установки для исследования сушки сыпучих материалов в «кипящем слое»

*а* – принципиальная схема; *б* – общий вид:

*1* – корпус установки;

*2* – технологическое отверстие для забора воздуха;

*3* – насадок со смотровым отверстием;

*4* – канальный вентилятор;

*5* – вентилятор охлаждения электроприборов;

*6* – выключатель двухклавишный;

*7* – распределительная коробка с индикаторами нагрузок;

*8* – регуляторы мощности вентилятора и ТЭНа;

*9* – датчики температуры;

*10* – электронные весы;

*11* – влагомер

Установка представляет собой вертикальную сушильную камеру, изготовленную из вентиляционных металлических труб диаметром 150 мм и закрепленную на деревянном корпусе с подставкой и ручкой. С фронтальной стороны установки расположен корпус сушилки 1, который разделен распределительной решеткой (ситом) на две секции: нижняя – является газораспределительной, а верхняя – сушильной камерой, имеющей съемный насадок 3 со смотровым отверстием. Для забора воздуха, являющегося сушильным агентом, в нижней части аппарата установлена металлическая заглушка с отверстиями 2, на которую смонтированы канальный вентилятор 4 и термоэлектронагреватель (ТЭН). Расход воздуха, обеспечиваемый вентилятором 4, и его температура задаются поворотными регуляторами мощности 8, расположенными на блоке управления с тыльной стороны установки. Регуляторы 8 маркированы «Т» – ТЭН, «В» – вентилятор и имеют четыре возможных положения.

Положения регулятора мощности вентилятора соответствуют следующим значениям скорости сушильного агента на входе в камеру:

- положение регулятора «1» –  $V = 2$  м/с;
- положение регулятора «2» –  $V = 3,2$  м/с;
- положение регулятора «3» –  $V = 4,5$  м/с;
- положение регулятора «4» –  $V = 5,2$  м/с.

Блок управления также включает распределительную коробку с индикаторами включения нагрузок 7 («220» – электросеть, «В» – вентилятор, «Т» – ТЭН), двухклавишный выключатель 6 (включение/выключение вентилятора и ТЭНа), цифровые датчики температуры 9 воздуха (на входе в сушильную камеру и выходе из нее), дополнительный вентилятор 5 для охлаждения электроприборов. Питание установки осуществляется от электросети 220 В.

В качестве дополнительного оборудования, необходимого для проведения экспериментов, используются электронные весы 10, влагомер 11, секундомер, линейка, термометр.

[Видеоматериал](#), иллюстрирующий последовательность проведения натурального эксперимента с использованием лабораторной установки (рис. 4.3), доступен по ссылке, представленной в виде QR-кода.



Для исследования пожарной опасности сушки сыпучих материалов в «кипящем слое» в рамках лабораторной работы необходимо провести несколько экспериментов, в ходе которых задаются различные значения расхода и температуры воздуха на входе в сушильную камеру, и регистрируются влажность обрабатываемого материала, а также скорость сушильного агента и его температура на выходе из сушильной камеры.

Исходными данными для проведения экспериментов и выполнения расчетов являются:

1. Наименование и начальная масса обрабатываемого материала (задается преподавателем).
2. Комбинация положений регуляторов мощности вентилятора и ТЭНа, обеспечивающая настройку сушилки для исследования номинальных и пожароопасных режимов работы (задается преподавателем).

#### **4.2.4. Порядок выполнения лабораторной работы**

1. Изучить теоретические сведения.
2. Ознакомиться с устройством лабораторной установки.
3. Разделиться на две подгруппы для проведения эксперимента. Преподаватель назначает старшего подгруппы. Каждый участник при проведении эксперимента выполняет конкретные обязанности, определяемые старшим подгруппы.
4. Получить у преподавателя исходные данные для проведения эксперимента (начальная масса  $m_1$  обрабатываемого материала), обрабатываемый материал (перловая, гречневая, рисовая крупа и т.п.) и

дополнительное лабораторное оборудование (весы, влагомер, секундомер, линейка).

5. В журнал проведения испытаний (приложение Ж) записать исходные данные, используя предварительные измерения и расчеты.

6. Провести эксперимент №1 (регулятор мощности вентилятора в положении «1», ТЭН выключен) в следующем порядке:

6.1. Снять насадок 3 с установки, поместить его на весы 10, насыпать заданную массу  $m_1$  обрабатываемого материала.

6.2. Опустив датчик (щуп) влагомера 11 в материал, произвести измерение его начальной влажности  $w_1$ . Результат занести в табл. 4.2.

6.3. После взвешивания и измерения влажности материала насадок 3 закрыть сверху сеткой и закрепить на лабораторной установке.

6.4. Подключить установку к электросети 220 В.

6.5. Правой кнопкой выключателя 6 включить вентилятор 4, установить регулятор мощности 8 вентилятора «В» в положение «1».

6.6. Убедиться, что ТЭН выключен (левая кнопка выключателя 6 в положении «выключено», индикатор нагрузки «Т» на распределительной коробке 7 не горит).

6.7. Спустя 30 секунд выполнить измерение температуры воздуха на входе в сушильную камеру и выходе из нее посредством цифровых датчиков температуры 9. Результаты измерения  $t_{вх}$  и  $t_{вых}$  занести в табл. 4.2.

6.8. Выполнить измерение высоты  $H$  слоя материала в сушильной камере, используя линейку. Результат занести в табл. 4.2.

6.9. Занести в табл. 4.2 скорость  $V$  сушильного агента на входе в сушильную камеру, соответствующую заданному положению регулятора мощности вентилятора.

6.10. Выключателем 6 отключить вентилятор и ТЭН, отключить установку от электросети.

6.11. Снять насадок 3, поместить датчик (щуп) влагомера 11 в материал, произвести измерение его конечной влажности  $w_2$ . Результат занести в табл. 4.2.

6.12. Удалить обработанный материал из насадка 3, поместить пустой насадок на установку.

7. Провести эксперимент №2 (регулятор мощности вентилятора в положении «2», ТЭН выключен). Для выполнения эксперимента повторить пп. 6.1-6.12, установив регулятор мощности вентилятора в положение «2».

8. Провести эксперимент №3 (регулятор мощности вентилятора в положении «3», ТЭН выключен). Для выполнения эксперимента повторить пп. 6.1-6.12, установив регулятор мощности вентилятора в положение «3».

9. Провести эксперимент №4 (регулятор мощности вентилятора в положении «4», ТЭН выключен). Для выполнения эксперимента повторить пп. 6.1-6.12, установив регулятор мощности вентилятора в положение «4».

10. Провести эксперимент №5 (вентилятор выключен, регулятор мощности ТЭНа в положении «2») в следующем порядке:

10.1. Повторить пп. 6.1-6.4.

10.2. Убедиться, что вентилятор 4 выключен (правая кнопка выключателя 6 в положении «выключено», соответствующий индикатор нагрузки «В» не горит).

10.3.левой кнопкой выключателя 6 включить ТЭН, установить регулятор мощности ТЭНа в положение «2».

10.4. Повторить пп. 6.7-6.12.

11. Провести эксперимент №6 (регулятор мощности вентилятора в положении «2», регулятор мощности ТЭНа в положении «4») в следующем порядке:

11.1. Повторить пп. 6.1-6.4.

11.2. Правой кнопкой выключателя 6 включить вентилятор 4, установить регулятор мощности вентилятора в положение «3».

11.3.левой кнопкой выключателя 6 включить ТЭН, установить регулятор мощности ТЭНа в положение «4».

11.4.Повторить пп. 6.7-6.12.

12.Провести эксперимент №7 (регулятор мощности вентилятора в положении «4», регулятор мощности ТЭНа в положении «4») в следующем порядке:

12.1.Повторить пп. 6.1-6.4.

12.2.Правой кнопкой выключателя 6 включить вентилятор 4, установить регулятор мощности вентилятора в положение «4».

12.3.левой кнопкой выключателя 6 включить ТЭН, установить регулятор мощности ТЭНа в положение «4».

12.4.Повторить пп. 6.7-6.12.

13. На основании выражения (4.5) для каждого эксперимента вычислить производительность  $G_2$  сушилки «кипящего слоя» по высушенному материалу. Результаты занести в табл. 4.2.

14. На основе анализа экспериментальных и расчетных данных сделать выводы по работе.

Таблица 4.2 – Экспериментальные и расчетные данные

Эксперимент	Влажность продукта, %		Скорость сушильного агента на входе в камеру $V$ , м/с	Высота витания гранул $H$ , м	Температура сушильного агента, °С		Производительность установки по высушенному материалу $G_2$ , кг/ч
	начальная $w_1$	конечная $w_2$			на входе $t_{ex}$	на выходе $t_{вых}$	
№1							
№2							
...							

#### 4.2.5. Требования к оформлению отчета по лабораторной работе

Отчет по работе должен содержать:

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальную схему установки.

3. Исходные данные.

4. Результаты измерений и обработки экспериментальных данных (табл. 4.2), в том числе расчетные формулы.

5. Выводы по работе.

Преподаватели принимают отчет по лабораторной работе в подгруппах.

#### **4.2.6. Контрольные вопросы**

1. Перечислите виды сушки.

2. Приведите классификацию сушилок по способу подвода тепла к материалу.

3. Постройте принципиальную схему сушилки «кипящего слоя».

4. Объясните, чем обусловлена пожарная опасность сушилок.

5. Перечислите характерные источники зажигания в сушилках.

6. Объясните, как определяется количество испаренной влаги в процессе сушки.

7. Напишите уравнение баланса сушки.

8. Поясните порядок проведения эксперимента.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 № 123-ФЗ // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_78699/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699/) (дата обращения: 01.10.2022).
2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : Приказ МЧС России от 10.07.2009 № 404 // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_91229/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_91229/) (дата обращения: 01.10.2022).
3. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=4371> (дата обращения: 01.10.2022).
4. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=17479> (дата обращения: 01.10.2022).
5. ГОСТ 31874-2012. Нефть сырая и нефтепродукты. Определение давления насыщенных паров методом Рейда // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200103323> (дата обращения: 01.10.2022).
6. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» // КонсультантПлюс : [сайт]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_89061/c2e0537c74e6a91a3f0895023b8defd3f19c3080/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_89061/c2e0537c74e6a91a3f0895023b8defd3f19c3080/) (дата обращения: 01.10.2022).

7. Бобылёв, В. Н. Физические свойства наиболее известных химических веществ: справочное пособие / В. Н. Бобылёв. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2003. – 24 с.
8. Зиновьев, В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В. Е. Зиновьев. – М. : Metallurgia, 1989. – 384 с.
9. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : справочник в 2-х частях / А. Я. Корольченко, Д. А. Корольченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Асс. Пожнаука, 2004. – Ч. 1. – 713 с. ; Ч. 2. – 774 с.
10. Лабораторный практикум по курсу «Пожарная безопасность технологических процессов» : учебно-методическое пособие / В. С. Клубань, А. П. Петров, С. А. Горячев [и др.] ; под общ. ред. В. С. Клубаня. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. – 66 с.
11. Нефтепродукты : учебно-справочное пособие в 2 ч. Часть 2. Основные характеристики. Методы оценки качества / А. И. Кузнецов, Ф. В. Тимофеев, А. А. Кузнецов, В. Е. Кормилицына. – Ульяновск : Ульяновский государственный университет, 2018. – 250 с.
12. Пожарная безопасность технологических процессов : методические рекомендации по выполнению курсовых проектов / Я. С. Киселев, О. А. Хорошилов, А. В. Собкалов, Г. В. Бушнев. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2008. – 88 с.
13. Пожарная безопасность технологических процессов : учебник / С. А. Швырков, С. А. Горячев, Л. Т. Панасевич [и др.] ; под общей редакцией С. А. Швыркова. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2020. – 426 с.
14. Пожарная безопасность технологических процессов: лабораторный практикум / М. А. Симонова, Г. В. Бушнев, Е. Н. Кадочникова, Д. В. Савельев. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2015. – 68 с.

15. Пожарная безопасность технологических процессов: учебное пособие / О. А. Хорошилов, М. Т. Пелех, Г. В. Бушнев, А. В. Иванов ; под общей редакцией В. С. Артамонова. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2012. – 300 с.
16. Пожарная безопасность типовых технологических процессов (часть 2) : учебное пособие / М. Т. Пелех, Г. В. Бушнев, М. А. Симонова, Е. Н. Кадочникова. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2014. – 241 с.
17. Предохранительные мембраны: справ. пособие / В. И. Водяник, Н. Н. Малахов, В. Т. Полтавский, И. П. Шелюк. – М. : Химия, 1982. – 144 с.
18. Расчет и проектирование теплообменников : учебное пособие для вузов / А. Н. Остриков, И. Н. Болгова, Е. Ю. Желтоухова [и др.] ; под редакцией А. Н. Острикова. – 2-е изд., испр. и доп. – Санкт-Петербург : Лань, 2021. – 372 с.
19. Теория горения и взрыва / В. Р. Малинин, В. И. Клишкин, С. В. Анискин [и др.] ; под. ред. проф. В. С. Артамонова. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2009. – 280 с.
20. Хафизов, Ф. Ш. Давление насыщенных паров для нефтепродуктов / Ф. Ш. Хафизов, А. В. Краснов // Нефтегазовое дело. – 2012. – №. 3. – С. 406.

ЖУРНАЛ

экспериментального исследования изменения давления паров  
легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в закрытом аппарате

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_  
Дата: \_\_\_\_\_

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Нормальное атмосферное давление:  $p_0 = 101,325$  кПа.

Рабочее давление в аппарате (барометрическое):  $p_p = p_б =$  \_\_\_\_\_ кПа.

Наименование жидкости: \_\_\_\_\_.

Рабочая температура:  $t_p =$  \_\_\_\_\_ °С.

Температура вспышки:  $t_{всп} =$  \_\_\_\_\_ °С.

Константы уравнения Антуана:  $A =$  \_\_\_\_\_;  $B =$  \_\_\_\_\_;  $C_A =$  \_\_\_\_\_.

Концентрационные пределы распространения пламени:

НКПР:  $\varphi_n =$  \_\_\_\_\_ % об.

ВКПР:  $\varphi_в =$  \_\_\_\_\_ % об.

Коэффициент диффузии паров жидкости в воздухе при 0 °С:

$D_0 =$  \_\_\_\_\_ м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент диффузии паров жидкости при  $t_p$ :

$$D_t = D_0 \cdot \left( \frac{273 + t_p}{273} \right)^n \cdot \frac{p_p}{p_0} = \text{_____ м}^2/\text{с.}$$

Относительный градиент концентрации на поверхности зеркала жидкости:  $n = 2$ .

Геометрические характеристики аппарата (сосуда):

диаметр сосуда:  $D_c =$  \_\_\_\_\_ м;

высота паровоздушного пространства сосуда:  $H =$  \_\_\_\_\_ м;

объем паровоздушного пространства сосуда:  $V = \frac{H \cdot \pi \cdot D_c^2}{4} = \text{_____ м}^3$ ;

площадь поверхности испарения жидкости:  $F = \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} = \text{_____ м}^2$ ;

расстояние от крышки сосуда до точки измерения концентрации:  $Z = 0$  м.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

№ п/п	Данные	Давление паров $p_m$ , кПа	Давление насыщенных паров $p_s$ , кПа	Концентрация насыщенных паров $\varphi_s$		Время $\tau_{on}$ , с
				об. доли	% об.	
1.	экспериментальные					
2.	расчетные на основании (1.6)	-				
3.	расчетные на основании (1.7)	-				

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### ЖУРНАЛ

экспериментального исследования пожарной опасности повышения давления  
в нагреваемом аппарате, заполненным горючей жидкостью

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование жидкости: \_\_\_\_\_.

Интервалы времени измерения:  $\Delta \tau =$  \_\_\_\_\_ с.

Объем баллонов 3.1, 3.2:  $V = 0,001 \text{ м}^3$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

№ п/п	Показатели жидкости		Эксперимент										
			№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8	№9	№10	
1.	Температура, К	начальная $T_n$											
		конечная $T_k$											
		приращение $\Delta T$											
2.	Давление, МПа	начальное $p_n$											
		конечное $p_k$											
		приращение $\Delta p$											
3.	Объем, мл	начальный $V_n$											
		конечный $V_k$											
		приращение $\Delta V$											
4.	Коэффициент объемного расширения жидкости $\beta_p, \text{К}^{-1}$												
5.	Коэффициент объемного сжатия жидкости $\beta_{сж}, \text{МПа}^{-1}$												
6.	Максимально допустимая степень заполнения $\varepsilon$												

ЖУРНАЛ

экспериментального исследования узла трения как источника зажигания

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование смазки: \_\_\_\_\_.

Рабочий температурный диапазон смазки: \_\_\_\_\_ - \_\_\_\_\_ °С.

Температура окружающей среды (комнатная):  $t_{cp} =$  \_\_\_\_\_ °С.

Массы грузов:  $m = \{ \text{_____}; \text{_____}; \text{_____} \}$  кг.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

Эксперимент		Масса груза $m$ , кг	Нагрузка $N$ , Н	Температура на поверхности узла трения $t$ , °С			
				$t_1$	$t_2$	$t_3$	$\bar{t}$
№1. Без смазки	1.1.	0					
	1.2.						
	1.3.						
	1.4.						
№2. Со смазкой	2.1.	0					
	2.2.						
	2.3.						
	2.4.						
« _____ »							

ЖУРНАЛ

экспериментального исследования электрических искр как источника зажигания

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование горючего материала: \_\_\_\_\_.

Температура воспламенения:  $T_{\text{в}} =$  \_\_\_\_\_ К.

Температура самовоспламенения:  $T_{\text{св}} =$  \_\_\_\_\_ К.

Наименование материала электродов: \_\_\_\_\_.

Плотность металла:  $\rho_{\text{к}} =$  \_\_\_\_\_ кг/м<sup>3</sup>.

Удельная теплоемкость расплава металла:  $C_{\text{р}} =$  \_\_\_\_\_ Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Удельная теплоемкость металла:  $C_{\text{к}} =$  \_\_\_\_\_ Дж·кг<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.

Температура плавления металла:  $T_{\text{пл}} =$  \_\_\_\_\_ К.

Температура капли в начале полета:  $T_{\text{н}} = 3273$  К.

Высота падения капли металла:  $H =$  \_\_\_\_\_ м.

Температура окружающей среды (воздуха):  $T_0 =$  \_\_\_\_\_ К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

№ п/п	Диаметр капли $d_{\text{к}}$ , м	Время зажигания $t_{\text{заж}}$ , с	Конечная температура капли $T_{\text{кон}}$ , К	Энергия зажигания $W$ , Дж
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.				
9.				
10.				

ЖУРНАЛ

экспериментального исследования противопожарных мембран

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_

Дата: \_\_\_\_\_

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование материала мембраны: \_\_\_\_\_.

Временное сопротивление материала мембраны:  $\sigma_{вр} = 40000$  кПа.

Диаметр мембраны:  $D =$  \_\_\_\_\_ м.

Относительное удлинение материала мембраны при разрыве:  $\delta = 0,2$ .

Температурный поправочный коэффициент:  $k_t = 1$ .

Толщина 1 слоя материала мембраны: \_\_\_\_\_ мм.

Количество слоев материала мембраны для эксперимента №1:

$n_1 =$  \_\_\_\_\_.

Количество слоев материала мембраны для эксперимента №2:

$n_2 =$  \_\_\_\_\_.

Толщина мембраны для эксперимента №1:  $\Delta_{01} =$  \_\_\_\_\_ мм.

Толщина мембраны для эксперимента №2:  $\Delta_{02} =$  \_\_\_\_\_ мм.

Атмосферное давление:  $p_0 =$  \_\_\_\_\_ кПа.

Коэффициент участия горючего во взрыве:  $Z =$  \_\_\_\_\_.

Свободный объем аппарата:  $V_{св} = 0,007065$  м<sup>3</sup>.

Мольный объем:  $V_0 = 22,413$  м<sup>3</sup>/кмоль.

Расчетная температура (комнатная):  $t_p =$  \_\_\_\_\_ °С.

Коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения:  $K_n = 3$ .

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

Эксперимент	Число слоев материала $n$	Объем газа $V_{ст}$ , м <sup>3</sup>	Масса газа $m$ , кг	Расчетное избыточное давление взрыва $\Delta p$ , кПа	Расчетное давление срабатывания мембраны $p_c$ , кПа	Срабатывание мембраны
№1						
№2						

ЖУРНАЛ

экспериментального исследования пожарной опасности теплообменных процессов

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_  
 Дата: \_\_\_\_\_

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование теплоносителя: вода.

Температура горячего теплоносителя на входе в аппарат:  $t'_1$   
 = \_\_\_\_\_ °С.

Приблизительный объемный расход горячего теплоносителя:  
 $G_{V1} = \text{---} - \text{---} \text{ м}^3/\text{мин.}$

Приблизительный объемный расход холодного теплоносителя:  
 $G_{V2} = \text{---} - \text{---} \text{ м}^3/\text{мин.}$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

Эксперимент		№1	№2	№3
Вид теплообменника		пластинчатый	кожухо- трубчатый	«труба в трубе»
Объемный расход теплоносителя, м <sup>3</sup> /мин	горячего $G_{V1}$			
	холодного $G_{V2}$			
Массовый расход теплоносителя, кг/с	горячего $G_1$			
	холодного $G_2$			
Температура горячего теплоносителя, °С	на входе $t'_1$			
	на выходе $t''_1$			
	средняя $\bar{t}_1$			
Температура холодного теплоносителя, °С	на входе $t'_2$			
	на выходе $t''_2$			
	средняя $\bar{t}_2$			
Мощность теплообменного аппарата $Q$ , кВт				

ЖУРНАЛ

экспериментального исследования пожарной опасности типовых способов  
сушки сыпучих материалов

Ф.И.О.: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Учебная группа: \_\_\_\_\_  
Дата: \_\_\_\_\_

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наименование обрабатываемого материала: \_\_\_\_\_.

Начальная масса обрабатываемого материала:  $m_1 =$  \_\_\_\_\_ кг.

Продолжительность эксперимента:  $\tau = 30$  с.

Производительность сушиллки по сырому продукту:

$$G_1 = \frac{m_1}{\tau} \cdot 3600 = \text{_____ кг/ч.}$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

Эксперимент	Влажность продукта, %		Скорость сушильного агента на входе в камеру $V$ , м/с	Высота витания гранул $H$ , м	Температура сушильного агента, °С		Производительность установки по высушенному материалу $G_2$ , кг/ч
	начальная $w_1$	конечная $w_2$			на входе $t_{\text{вх}}$	на выходе $t_{\text{вых}}$	
№1							
№2							
№3							
№4							
№5							
№6							
№7							

## ПРИЛОЖЕНИЕ И

Коэффициенты объёмного теплового расширения  $\beta_p$   
некоторых жидкостей [7]

Вещество Температура, К	Коэффициент расширения ( $\beta_p \cdot 10^3, K^{-1}$ )					
	293	303	313	323	333	343
Ацетон	1,352	1,419	1,488	1,560	1,634	1,713
Бензол	1,176	1,206	1,236	1,268	1,301	1,335
Вода	0,207	0,303	0,385	0,457	0,523	0,584
о-Ксилол	0,942	0,960	0,978	0,996	1,015	1,035
Этанол	1,079	1,103	1,133	1,170	1,217	1,275

Средние значения коэффициентов объёмного сжатия  $\beta_{сж}$   
некоторых жидкостей в интервале температур 0-100 °С  
и в интервале давлений 0,1-1,0 МПа [15]

Вещество	Коэффициент сжатия ( $\beta_{сж} \cdot 10^5, MPa^{-1}$ )
Ацетон	121
Бензол	74,7
Вода	49,1
о-Ксилол	74,0
Этанол	112

## ПРИЛОЖЕНИЕ К

### Теплофизические свойства железа [8]

Плотность $\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>	$7,87 \cdot 10^3$
Удельная теплоемкость $C_k$ , Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	450
Удельная теплоемкость расплава $C_p$ , Дж·кг <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>	834,9
Температура плавления $T_{пл}$ , К	1811
Удельная теплота плавления/кристаллизации $C_{кр}$ , Дж·кг <sup>-1</sup>	$84 \cdot 10^3$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л

### Физические свойства воды на линии насыщения [7]

Температура, °С	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
0	999,8	4217,6
2	999,9	4210,7
4	1000,0	4204,8
6	999,9	4199,9
8	999,8	4195,6
10	999,7	4192,1
11	999,6	4190,6
12	999,5	4189,2
13	999,4	4187,9
14	999,2	4186,7
15	999,1	4185,6
16	998,9	4184,7
17	998,8	4183,8
18	998,6	4183,0
19	998,4	4182,3
20	998,2	4181,7
21	998,0	4181,2
22	997,8	4180,7
23	997,5	4180,2
24	997,3	4179,8
25	997,0	4179,5
26	996,8	4179,2
27	996,5	4179,0
28	996,2	4178,8
29	995,9	4178,6
30	995,6	4178,5
31	995,3	4178,4
32	995,0	4178,3
33	994,7	4178,3
34	994,4	4178,2
35	994,0	4178,2
36	993,7	4178,3
37	993,3	4178,3
38	993,0	4178,4
39	992,6	4178,5
40	992,2	4178,6
41	991,8	4178,7
42	991,4	4178,9
43	991,0	4179,1
44	990,6	4179,2
45	990,2	4179,4
46	989,8	4179,7
47	989,4	4179,9
48	988,9	4180,1

## Окончание приложения Л

49	988,5	4180,4
50	988,0	4180,7
52	987,1	4181,3
54	986,2	4182,0
56	985,2	4182,7
58	984,2	4183,5
60	983,2	4184,4
62	982,2	4185,3
64	981,1	4186,3
66	980,0	4187,4
68	978,9	4188,5
70	977,8	4189,7
72	976,6	4190,9
74	975,4	4192,2
76	974,2	4193,6
78	973,0	4195,0
80	971,8	4196,5
82	970,5	4198,1
84	969,3	4199,7
86	968,0	4201,4
88	966,7	4203,2
90	965,3	4205,0
92	964,0	4207,0
94	962,6	4209,1
96	961,2	4211,4
98	959,8	4213,8
100	958,4	4216,4
105	954,7	4222,2
110	951,0	4229,0
115	947,1	4236,5
120	943,1	4244,7
125	939,0	4253,7
130	934,8	4263,3
135	930,4	4273,7
140	926,0	4284,9
145	921,5	4297,0
150	916,9	4309,9
155	912,1	4323,7
160	907,3	4338,4
165	902,4	4354,1
170	897,3	4370,8
175	892,1	4388,6
180	886,9	4407,6
185	881,5	4427,9
190	876,0	4449,4
195	870,4	4472,4
200	864,7	4496,9

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

учебное пособие

**Авторы:**

Пожаркова Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доцент

Трояк Евгений Юрьевич, канд. пед. наук

Антонов Александр Викторович, канд. техн. наук