

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(национальный исследовательский университет)  
Факультет «механико-технологический»  
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, к.т.н.

Иван Е.М. Нивосилов  
«24» июня 2016 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,

д.т.н профессор

Владимир А.И. Сидоров  
«24» юн 2016 г.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ САХАРНОЙ ПЫЛИ НА  
МАКСИМАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ ВЗРЫВА ПЫЛЕВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ  
ЮУрГУ-20.04.01.2016.121 ПЗ МД

Руководитель работы, к.т.н. доцент

Борис С.И. Боровик  
«23» апреля 2016 г.

Автор работы, студент  
группы МТ-212.

Михаил М.А. Гаёв  
«27» юн 2016 г.

Нормоконтролер, доцент

Александр А.В. Кудряшов  
«23» июня 2016 г.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(национальный исследовательский университет)

Факультет «Механико-технологический»  
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»  
Направление «Техносферная безопасность»  
Магистерская программа «Пожарная безопасность»

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой БЖД



/ А.И. Сидоров /

« 09 » 03 2016 г.

**ЗАДАНИЕ**

на подготовку магистерской диссертации

**Гаёва Михаила Андреевича**

(Ф. И.О. полностью)

Группа МТ-212

1 Тема диссертации «Анализ влияния дисперсности сахарной пыли на  
максимальное давление взрыва пылевоздушной смеси»

утверждена приказом по университету от 15.04 2016 г. № 661

2 Срок сдачи магистрантом законченной диссертации 23.06.2016

3 Исходные данные к диссертации Материалы, собранные во время практик

4 Содержание (перечень подлежащих разработке вопросов)

Введение

1. Литературный обзор

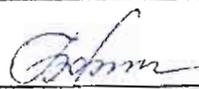
1.1. Свойства и характеристика взрывоопасных пылей

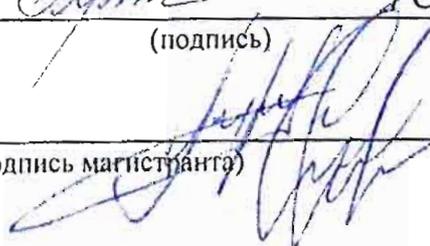
1.2. Производство и переработка сахара

- 1.3. Взрывопожароопасные свойства пылей
  2. Объекты и методы исследования
    - 2.1. Объекты исследования
    - 2.2. Методы исследования
  3. Определение максимального давления взрыва измельчённого сахара
    - 3.1 Размол материала и проведение ситового анализа измельченного сахара
    - 3.2 Определение удельной поверхности материала
    - 3.3 Определение максимального давления взрыва измельчённого сахара
  4. Обработка и обсуждение результатов
- Заключение
- Библиографический список
- Приложения
- 5 Перечень графического материала
    1. Цель и задачи работы
    2. Актуальность работы
    3. Статистические данные взрывов на взрывоопасных объектах
    4. Ситовой анализ материала
    5. Схема переработки сахара
    6. Взрывопожароопасные свойства сахара
    7. Результаты эксперимента
    8. Зависимость максимального давления взрыва от степени измельчения
    9. Выводы

Всего 9 листов/иллюстраций

6 Дата выдачи задания \_\_\_\_\_

Руководитель \_\_\_\_\_  / С.И. Боровик /  
(подпись) (И.О.Ф.)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  / М.А. Гаёв /  
(подпись магистранта) (И.О.Ф.)

## КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов диссертации	Срок выполнения этапов диссертации	Отметка о выполнении руководителя
Введение	21.03.2016	<i>Борин</i>
Глава 1	05.04.2016	<i>Борин</i>
Глава 2	20.04.2016	<i>Борин</i>
Глава 3	15.05.2016	<i>Борин</i>
Глава 4	10.06.2016	<i>Борин</i>
Заключение	19.06.2016	<i>Борин</i>
Графический материал	21.06.2016	<i>Борин</i>

Заведующий кафедрой

*А.И. Сидоров*

А.И. Сидоров /

Руководитель

*С.И. Боровик*

С. И. Боровик /

Магистрант

*М.А. Гаёв*

М.А. Гаёв /

## РЕФЕРАТ

Гаёв М.А. Анализ влияния дисперсности сахарной пыли на минимальное давление взрыва пылевоздушной смеси – Челябинск: ЮУРГУ, МТ-112, 2016. – 63 с. 14 ил., 16 табл., библиогр. список – 21 наим.

Взрывопожароопасность, максимальное давление взрыва, фракционный состав, дисперсность, удельная поверхность, сахарная пыль.

Объектом исследования является сахарный песок с разной степенью измельчения.

Цель работы – исследование влияния размера частиц измельчённого сахара (сахарной пудры) на его взрывопожарную опасность.

Для достижения цели НИР решены следующие задачи:

- изучить взрывопожароопасные свойства сахарной пыли;
- изучение взрывопожароопасных показателей промышленных пылей и методов их определения
- исследовать влияние измельчения на фракционный состав удельной поверхности сахарной пыли;
- определить НКПР в зависимости от времени измельчения;
- исследовать влияние дисперсности сахарной пыли на максимальное давление взрыва.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР .....	7
1.1 Свойства и характеристика взрывоопасных пылей.....	7
1.2 Производство и переработка сахара.....	20
1.3 Методы, используемые при оценки пожаровзрывоопасности пылей .....	24
2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	37
2.1 Объекты исследований .....	37
2.2 Методы исследований.....	39
2.2.1 Метод размола сахар-песка на шаровой мельнице.....	39
2.2.2 Метод определения удельной поверхности порошков на приборе ПСХ-10А. ....	42
2.2.3 Ситовой анализ.....	44
2.2.4 Определение максимального давления взрыва.....	46
2.2.5 Метод определение концентрационных пределов.....	49
3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА ИЗМЕЛЬЧЁННОГО САХАРА.....	51
3.1 Размол материала и проведение ситового анализа измельчённого сахара .....	51
3.2 Определение удельной поверхности материала .....	52
3.3 Определение максимального давления взрыва измельчённого сахара .....	53
4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	58
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	63

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность проблемы:** В России функционируют около 8 тысяч взрывопожароопасных объектов. Большинство техногенных чрезвычайных ситуаций (до 80 %) обусловлено пожарами в зданиях жилого, социально-бытового и культурного назначения. Обеспечение безопасности персонала предприятия, населения и окружающей среды остается актуальным, особенно в области пожарной безопасности. Существенную угрозу для населения и природной среды представляют пожаровзрывоопасные зерноперерабатывающие, сахара-перерабатывающие, производство пластмасс, лекарственных препаратов, на установках дробления топлива (угольной пыли), в текстильном производстве. Статистические данные по пылевым взрывам, возникающим на предприятиях, что на комбикормовых заводах происходит – 36 % взрывов, мукомольных заводах – 20 % взрывов, сахара-перерабатывающих заводах – 24 % взрывов.

При производстве и переработке сахара неоднократно имели место аварии, связанные с образованием и взрывом их аэрозвесей, а также загоранием порошков или смесей на их основе. Отмечено мгновенное возгорание мелких частиц сахара (сахарной пудры), приводящее к резкому росту температуры и давления. При исследовании характеристик пожаровзрывоопасности материала было установлено, что величина взрыва зависит от дисперсности помола и способа измельчения материала.

Поэтому представляет определенный интерес изучение влияния на взрывопожароопасные характеристики сахара степени измельчения материала и фракционный состав.

**Целью данной работы** является исследование влияния размера частиц измельчённого сахара (сахарной пудры) на его взрывопожарную опасность.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучить взрывопожароопасные свойства сахарной пыли;
- изучение взрывопожароопасных показателей промышленных пылей и методов их определения

- исследовать влияние измельчения на фракционный состав удельной поверхности сахарной пыли;
- определить НКПР в зависимости от времени измельчения;
- исследовать влияние дисперсности сахарной пыли на максимальное давление взрыва.

**Объект исследования.** Сахарный песок с разной степенью измельчения.

**Предмет исследования.** Влияние степени измельчения сахара на пожаровзрывоопасные свойства пыли – максимальное давление взрыва.

**Научная новизна.** Исследование влияние степени измельчения на взрывопожарную опасность производства, позволит разработать мероприятия по взрывопожарной безопасности для взрывопожарных производств по переработке сахара и производству сахарной пудры.

**Апробация.** Международный научно–технической конференции «Достижения науки агропромышленному производству» (г. Челябинск, ЮУГАУ, 2016 г.).

**Публикации.** Опубликовано 1 статья в сборнике материалов научно-практической конференции.

**Структура.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, библиографического списка.

**Объём диссертации.** Текст диссертационной работы изложен на 63 страницах, включающих 14 рисунков и 16 таблиц и список цитируемой.

# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Свойства и характеристика взрывоопасных пылей

Во многих технологических процессах, осуществляемых в химических и смежных отраслях промышленности, участвуют материалы, находящиеся в дисперсном состоянии. Это и исходное сырье, и образующие полупродукты или конечные продукты. Внутри аппаратов и в воздухе производственных помещений дисперсные материалы образуют аэрозоли-системы, состоящие из твёрдых частиц, распределённых в газовой среде. Если такие аэрозоли горючи, то они представляют потенциальную опасность и их наличие требует соблюдение определённых мер безопасности.

Частицы, входящие в состав дисперсных систем, отличаются разнообразием форм и размеров. Форма и размеры частиц определяются как природой вещества, так и способом его получения и переработки. Частицы промышленных пылей имеют шарообразную, кубическую, дискообразную, цилиндрическую форму, а иногда это правильные призмы, пирамиды и др.

В состав пыли обычно входят частицы различных размеров. Для характеристики распределения частиц по размерам используют понятие эквивалентного диаметра. Для частиц произвольной формы эквивалентный диаметр определяется как диаметр шара имеющий объём, равный объёму средней частицы [8].

Эквивалентный диаметр – условная характеристика полидисперсного материала. Материалы с различным содержанием отдельных фракций могут иметь одинаковый диаметр.

Скорость осаждения пыли - аэрозоль образовавшийся внутри аппарата или в производственном помещении, в отсутствие побудительных сил осаждается. Скорость осаждения зависит от размеров и формы частиц. В условиях свободного падения скорость движения частиц постоянная, становится равным её массе. Если аэрозоль состоит из мелких частиц, сопоставимых по размерам с длиной

свободного пробега молекул газа, то взаимодействие с этими молекулами приводит к броуновскому движению, которое накладывается на процесс осаждения. В простейшем случае движение в газе жесткой частицы сферической формы, не взаимодействующей с другими частицами и имеющей размеры, превосходящие длину свободного пробега газовых молекул, описывается законом Стокса [8].

Электризуемость пылей – частицы аэрозоля, электронейтральные в момент образования, могут приобретать электрический заряд при контакте друг с другом, при трении о твердую поверхность или при движении в газовой среде. Установлено, что все факторы, вызывающие ионизацию газов (радиоактивное излучение ультрафиолетовое и рентгеновские лучи) способствуют появлению зарядов на частицах аэрозолей. Частицы состоящие из одного и того же вещества, в зависимости от условий электризации могут иметь одинаковые и различные по величине и знаку заряды.

Изучение условий образования электростатических зарядов при распылении порошков органических веществ показало, что степень асимметрии их заряда определяется соотношением числа частиц, соприкасающихся со стенкой сосуда и частиц, соприкасающихся только друг с другом. Величина образующегося заряда при прочих равных условиях зависит от скорости движения частиц, концентрации аэрозолей, формы и размеров частиц.

При удалении друг от друга частиц одного и того же вещества, а также при трении газа о твердые частицы возникают незначительные заряды. Исключение из этого правила составляют те случаи, когда масштабы процесса сопоставимы с такими, например, явлениями, как снежные или пыльные бури.

В работах некоторых исследователей сделан вывод о том, что механизм электризации заключается в передаче электронов при отрыве частиц друг от друга в процессе диспергирования пыли. Другие исследования свидетельствуют о возникновении электризации в результате обмена положительными ионами.

Для оценки степени электризации аэрозолей определяют либо заряды индивидуальных частиц, либо общий заряд аэрозоля. Второй способ не даёт

полной картины электризации, особенно для полидисперсных аэрозолей (т.е. в практически важных случаях). Электризацией сопровождаются дробление и измельчение твердых веществ, высушивание, смещение, распыление и другие процессы химической технологии, связанные с образованием пылей. Возможность появления разрядов статического электричества в этих процессах в значительной степени определяет уровень их пожаровзрывоопасности [8].

Теплофизическими характеристиками дисперсных материалов называют комплекс свойств, характеризующих реакцию материала на теплообмен. К ним относятся теплоёмкость, теплопроводность и температуропроводность. Теплофизические характеристики используют в расчётах процессов воспламенения, самовозгорания и горения дисперсных материалов.

Теплоёмкость – отношение количества теплоты, сообщенной системе в каком-либо процессе, к соответствующему изменению температуры. Обычно теплоёмкость относят к 1 г (или 1 кг) вещества (удельная теплоёмкость) или к 1 моль (молярная теплоёмкость). Различают среднюю теплоёмкость, соответствующую бесконечно малому изменению температуры [8].

Теплопроводность – перенос теплоты в результате движения молекул, атомов, ионов, свободных электронов.

Температуропроводность – характеризуется коэффициентом температуропроводности, выражающим скорость изменения температуры вещества в нестационарных условиях. Температуропроводность численно равна отношению коэффициента теплопроводности к произведению удельной теплоёмкости (при постоянном давлении) и плотности.

Коэффициенты теплопроводности многих дисперсных материалов близки к коэффициентам теплопроводности теплоизоляционных материалов. Отмеченная особенность играет существенную роль в развитии процессов самонагрева и самовозгорания скоплений дисперсных материалов и затрудняет отвод тепла из очага самонагрева. Пониженная теплопроводность объясняется наличием воздуха между частицами. Замечено, что наибольшей теплопроводностью

обладают вещества, имеющие большую насыпную плотность. И наоборот, снижение насыпной плотности приводит к уменьшению теплопроводности [8].

Теплота (энтальпия) сгорания вещества – это изменение энтальпии, которое является следствием изобарно и изотермически протекающей реакции горения единицы массы вещества с эквивалентным количеством кислорода. В химической термодинамике (и в практических расчётах) широко используют понятие стандартной теплоты сгорания – величины, отнесённой к исходным веществам и продуктам реакции, находящимся в стандартном состоянии, т.е. при температуре 25 °С и давлении 101,325 кПа.

Стандартную теплоту сгорания широко используют при оценке пожаровзрывоопасности аэрозолей; её применяют при определении горючести, при расчётах нижнего концентрационного предела распространения пламени, максимального давления взрыва, минимального взрывоопасного содержания кислорода, адиабатической температуры горения.

Для органических веществ, молекулы которых состоят из атомов углерода, водорода, кислорода и азота, теплоту сгорания вычисляют, считая продуктами сгорания диоксид углерода и азот в газообразном состоянии, воду – в жидком. Для веществ, содержащих атомы других элементов, как правило, указывают конечные продукты сгорания.

В некоторых случаях необходимо располагать данными о так называемой низшей теплоты сгорания – теплоте сгорания, которая меньше стандартной на теплоту конденсации образующийся при сгорании газообразной воды [8].

Самовозгорание – самовозгорание представляет собой процесс низкотемпературного окисления дисперсных материалов, заканчивающийся тлением или пламенным горением. Склонность к самовозгоранию веществ определяется комплексом их физико-химических свойств: теплотой сгорания, удельной поверхностью, теплопроводностью, теплоёмкостью объёмной плотностью и условиями теплообмена с внешней средой. Для развития процесса самовозгорания решающее значение приобретает возможность накопления в

материале тепла, выделяющегося в процессе окисления (или деятельности микроорганизмов).

Процессы самовозгорания развиваются в материалах при сравнительно низких температурах (как правило, не выше 520 К) в течение длительного времени. В таких условиях для поддержания процесса оказывается недостаточно тепла, выделяемого окисляющейся внешней поверхностью. Обязательным условием самовозгорания является вовлечение в реакцию окисления (или разложения) всей массы материала. При этом замечено, что чем больше масса, тем легче начинаются в ней процессы самонагрева и самовозгорания.

Длительность процессов, приводящих к самовозгоранию измеряется часами и даже десятками и сотнями часов. Известен случай, когда самовозгорание древесных опилок произошло по истечении одного года их контакта с поверхностью, имевшей температуру 283–293 К. Развитие процессов самонагрева веществ может быть обусловлено разными причинами: жизнедеятельность микроорганизмов в подходящей питательной среде, воздействие на материал повышенных температур, а также выделение тепла при каких-либо химических превращениях. В соответствии с этим условно можно выделить три механизма самовозгорания: микробиологическое, тепловое и химическое.

Микробиологическое самовозгорание – к микробиологическому самовозгоранию склонны материалы главным образом растительного происхождения, которые могут служить питательной средой для бактерий, грибов. Возможность развития процесса самовозгорания по микробиологическому механизму имеет ограничение: температура самонагрева материала не должна превышать 348 К, поскольку при более высоких температурах микроорганизмы, как правило, погибают [8].

Тепловое самовозгорание – многие дисперсные материалы взаимодействуют с кислородом воздуха уже при обычной температуре. В условиях, благоприятствующих накоплению тепла в массе материала, происходит повышение его температуры. Это в свою очередь повышает скорость реакции

окисления и может привести к самовозгоранию дисперсного материала внутри технологического оборудования, внутри воздуховодов, при транспортировании и хранении и т.д.

Тепловое самовозгорание – физико-химический процесс, скорость которого зависит от скорости химической реакции, поступления кислорода к реагирующей поверхности и от интенсивности теплообмена самонагревающегося материала с внешней средой.

Дисперсные материалы, сложенные для хранения или находящиеся в технологическом процессе, имеют чёткую границу соприкосновения с окружающей средой. По этой границе воздух проникает между частицами внутрь массы материала. Кислород, попадая в поры частиц или волокон дисперсных материалов, адсорбируется в поверхностном слое. Многие твёрдые вещества содержат в своём составе химически связанный кислород (например нитро соединения, нитроз соединения, высшие спирты, кислоты и др.), который при определённых условиях также может принимать участие в процессе окисления. Наличие развитой поверхности твёрдого материала с адсорбированным на ней кислородом – необходимое условие для начала теплового самовозгорания. Если в процессе самонагревания вещество плавится, тем самым сокращая свою удельную поверхность, самонагревание может прекратиться. В то же время, если плав вещества попадает на развитую поверхность негорючего материала, развитие процесса самовозгорания может интенсифицироваться [8].

Гетерогенный процесс взаимодействия вещества с кислородом происходит на поверхности частиц в диффузионном или кинетическом режиме. Если общее время процесса превышает время химического превращения, то реализуется диффузионный режим, т.е. скорость процесса определяется законами диффузионной кинетики. В кинетическом режиме скорость окисления практически не зависит от притока кислорода извне, процесс поддерживается вступающим в реакцию кислородом, который адсорбирован на поверхности частиц. В этом режиме может быть достигнута температура, при которой начинается тление материала. Известно, что тление многих органических

материалов возможно при очень низких концентрациях кислорода в окружающем воздухе – порядка 3–5 % (об.).

Существенную роль в развитии процесса самовозгорания играет пористость материала. Воздух, заполняющий пространство между частицами материала и адсорбированной в порах, участвует в самонагревании. В результате диффузии он поступает к реагирующей поверхности. Поэтому, наиболее склонны к тепловому самовозгоранию материалы, обладающие большой пористостью и структурой, обеспечивающей проникновение кислорода в зону реакции. Склонность к самовозгоранию увеличивается при повышении адсорбированной способности материала. Самонагревающаяся масса твёрдого материала имеет неоднородное температурное поле вследствие различных условий теплоотвода: центральные зоны объёма нагреваются до более высоких температур, чем поверхностные. В свою очередь высокая температура интенсифицирует экзотермические реакции окисления, протекающие в массе материала, повышая общую скорость процесса.

На начальном этапе самовозгорания для многих материалов характерно сокращение внешнего вида, хотя во внутренней части происходит интенсивное обугливание. Затем на обугленной поверхности развивается процесс тления, который может перейти и в пламенное горение. Поскольку промежуточным продуктом при самовозгорании большинства органических материалов является уголь, закономерности его самовозгорания должны оказывать существенное влияние на процесс в целом. Значительную роль в самовозгорании углей играет их способность адсорбировать на начальной стадии процесса пары влаги из окружающего воздуха. Установлено, что в результате адсорбции паров воды материал может нагреваться до 65–70 °С (при поглощении 0,01 г влаги выделяется 22,6 Дж тепла).

Химическое самовозгорание – ускорению процесса самовозгорания способствуют такие факторы, как повышенная аккумуляция тепла, развитая поверхность материала и его лёгкая воспламеняемость. Особую роль эти факторы играют при химическом самовозгорании. Известно, что скорость химических

реакций, как правило, резко возрастает с увеличением температуры. Это обстоятельство имеет большое значение при химическом самовозгорании. Поскольку процессы окисления экзотермичны, в условиях затруднённого теплоотвода выделяющееся тепло идёт на нагрев массы материала, ускоряя тем самым достижение критических условий самовозгорания.

Дисперсные материалы обладают всеми свойствами, которые благоприятно влияют на развитие самовозгорания и поэтому самовозгорание, вызванное контактом дисперсных материалов с различными веществами, достаточно часто служит причиной пожаров и загораний.

Температура вспышки – самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний под его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать в воздухе от постороннего источника зажигания, устойчивого горения вещества при этом не возникает. Значения температуры вспышки используют при категорировании производств по степени взрывопожароопасности [8].

Температура воспламенения – наименьшая температура, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что после их зажигания внешним источником возникает самостоятельное пламенное горение. Определение температуры воспламенения необходимо при классификации веществ по степени горючести, при оценке пожарной опасности оборудования и технологических процессов, связанных с переработкой горючих веществ. В практических условиях температура воспламенения может оказаться ниже, чем найденная в эксперименте, в случае воздействия на вещество более мощных источников зажигания.

*Самовоспламенение.* Температура самовоспламенения – самая низкая температура аэрозоля, при нагреве до которой резко увеличивается скорость экзотермических реакций и возникает пламенное горение. В связи с тем, что непосредственно измерить температуру частиц сложно, за температуру самовоспламенения аэрозоля принимают температуру стенки реакционного сосуда, в котором происходит самовоспламенение.

К настоящему времени разработана аппаратура для исследования зажигающей способности электрических искр, накоплен солидный экспериментальный материал минимальной энергии зажигания аэрозолей. Зажигание заключается в нагреве небольшой части аэрозоля до температуры, превышающей его температуру горения. При этом резко увеличивается скорость окисления горючего кислородом воздуха, что обеспечивает выделение тепла, необходимого для поддержания дальнейшего горения. Механизм зажигания аэрозолей органических веществ отличается от механизма металлов. В зоне действия искрового источника зажигания, где в некоторый промежуток времени создаётся высокая температура, где в некоторый промежуток времени создаётся высокая температура, частицы органических веществ плавятся и испаряются (или разлагаются) с образованием газообразных продуктов. Зажигание происходит уже в образовавшихся газах. Поэтому к условиям зажигания аэрозолей органических веществ применимы закономерности, установленные для газов.

Распределение температуры вокруг мгновенно действующего источника тепла через различные промежутки времени после прекращения этого действия. В горючей газовой смеси процесс охлаждения замедляется вследствие выделения тепла при экзотермической реакции окисления. В тот момент, когда температура в первоначальном сферическом объеме снизится до температуры радиуса, дальнейшее падение прекратится вследствие компенсации тепла, отводимого в окружающие слои, теплом, выделившимся при сгорании. Таким образом, создаются условия, аналогичные распространения фронта пламени. Зажигание горючей газовой смеси искровым разрядом сводится к нагреванию некоторого сферического объёма этой смеси, радиус которого должен превышать характерную ширину фронта ламинарного пламени. Это условие обеспечивает воспламенение окружающей смеси до момента остывания первоначального объёма. Минимальная энергия искрового разряда которая необходима для нагрева от начальной температуры до температуры горения шарообразного объёма с радиусом, пропорциональным ширине фронта пламени.

При оценке ширины фронта ламинарного пламени можно учесть, что решающую роль в распространении фронта пламени играет область, нагретая до температуры. Необходимая для зажигания горючей смеси энергия искрового заряда при постоянном давлении должна быть обратно пропорциональна кубу нормальной скорости распространения пламени, если начальный очаг горения имеет сферическую форму (в предположении, что коэффициент температуропроводности воздуха и мало зависит от состава смеси и природы горючего). Исследованиями многих авторов подтверждено существование подобной зависимости. Факторы, способствующие изменению ширины фронта пламени, такие как изменение начального давления, изменение состава смеси или разбавление её инертными газами, оказывают влияние на минимальную энергию зажигания.

Влияние электрического разряда на минимальную энергию зажигания — при экспериментальном изучении процесса зажигания аэрозолей электрическими искрами, энергия зажигания, которая способна зажечь пылевое облако, заметно уменьшалась, если в разрядный контур включалось дополнительное сопротивление. Энергия зажигания снижается примерно на порядок при включении в разрядный контур дополнительного сопротивления величиной  $10^5$ – $10^6$  Ом. Подобное явление было обнаружено при измерении энергии зажигания ферромарганца, цинка, кремния и серы. Однако, можно полагать, что включение в разрядную цепь довольно больших сопротивлений приводит к потерям энергии на них. Поэтому энергия, выделяющиеся в разрядном промежутке, значительно меньше, чем вычисленная. В последствии было установлено, что при наличии в цепи дополнительного сопротивления от  $10$  до  $10^7$  Ом, эффективная мощность разряда составляет лишь 5–10 % от начальной энергии конденсатора. Последовательное включение в разрядный контур сопротивления в  $10^5$  Ом приводит к снижению энергии зажигания примерно в 10 раз [8].

Данные подтверждающие возможность резкого снижения энергии зажигания при использовании разрядного контура, который мог бы генерировать искры с длительностью разряда, сопоставимой с временем существования искры.

С учётом того обстоятельства, что не более 10% запасённой в конденсаторе энергии выделяется в разрядном промежутке, приводит к заключению о возможности зажигания аэрозолей искрами с эффективной энергией около 1 мДж.

Объём реакционной камеры, выполненной из прозрачного оргстекла, составлял 70 л. Навеску исследуемой пыли после продувки трубы смесью воздуха с горючим газом заданного состава помещали в распылитель, расположенный в нижней части трубы. Зажигающая искра создавалась в трёх электродном искровом промежутке, обеспечивающем минимальные потери энергии в разрядном контуре. Искра в разрядном промежутке в 4–6 мм возникла при разряде конденсатора С, который предварительно задержали до заранее установленного напряжения зарядным устройством.

Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) – закономерности изменения пределов распространения пламени смесей горючих газов хорошо известны. В большинстве случаев они подчиняются правилу смещения Ле-Шателье.

Нижний концентрационный предел распространения пламени – минимальное содержание горючего в смеси горючее вещество – окислительная среда, при котором возможно распространение пламени на любое расстояние от источника зажигания. На величину НКПР аэрозолей оказывают влияние форма и состояние поверхности частиц, их дисперсный состав и влажность. Значения НКПР используют при категорировании производств по степени взрывопожароопасности в соответствии со СНиП и для сравнительной оценки взрывоопасности промышленных пылей. Безопасная концентрация горючей пыли в воздухе может быть вычислена по формуле:

$$\varphi_{\text{без}} \leq \frac{\text{НКПР}}{K_{\text{бн}}}, \quad (1.1)$$

где  $K_{\text{бн}}$  – коэффициент безопасности к нижнему концентрационному пределу распространения пламени.

Минимальная энергия зажигания – наименьшая энергия искрового разряда, способная воспламенить наиболее легко воспламеняющуюся смесь пыли

с воздухом. По минимальной энергии зажигания сравнивают взрывоопасность пылей и вычисляют допустимую энергию искрового разряда:

$$E_{\text{без}} \leq \frac{E_{\text{мин}}}{K_{\text{бз}}}, \quad (1.2)$$

где  $K_{\text{бз}}$  – коэффициент безопасности к энергии зажигания.

Флегматизация взрывов пыли – пределы распространения пламени горючих аэрозолей разбавлении смеси каким-либо негорючим или трудногорючим веществом изменяются по мере увеличения концентрации разбавителя. При этом нижний концентрационный предел распространения пламени обычно несколько возрастает, а верхний концентрационный предел распространения пламени снижается. Изменение пределов происходит до тех пор, пока они не сливаются в одной точке, называемой экстремальной точкой области воспламенения или точкой флегматизации. Содержание инертного разбавителя в этой точке – это минимальное взрывоопасное содержание кислорода. Метод инертизации горючих аэрозолей широко применяют для обеспечения пожаровзрывобезопасности переработки дисперсных материалов. Математически условие флегматизации горючих аэрозолей инертными газами может быть получено анализом одномерной модели плоского ламинарного фронта пламени. Примем, что теплофизические свойства газа и горючей твёрдой фазы постоянны, теплопроводность газозвеси мало отличается от теплопроводности газа, частицы горючего имеют сферическую форму. Частицы свежей смеси смеси нагреваются кондукцией из зоны нагретых продуктов сгорания.

Горючесть – способность вещества к горению. Горючесть зависит от параметров состояния системы вещество – окислительная среда (температуры, давления, объёма). Горючесть пылей зависит от степени их измельчения. По горючести пыли (как и другие вещества) разделяют на три группы: негорючие, трудногорючие и горючие. Группу горючести используют при отнесении производства к той или иной категории по степени взрывопожароопасности в соответствии со СНиП, а также для обеспечения пожаровзрывобезопасности процессов получения, хранения и транспортирования дисперсных материалов. Условия безопасности при этом формулируется

следующим образом: горючесть дисперсного материала должна быть не выше регламентированной:

$$t_{r, без} \leq \frac{t_{п}}{K_{бп}}, \quad (1.3)$$

$$l_{без} \leq \frac{l_{кр}}{K_{бр}}, \quad (1.4)$$

$$d_{без} \leq \frac{d_{кр}}{K_{бр}}, \quad (1.5)$$

где  $t_{r, без}$  – допустимая температура горючей среды,

$^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{п}$  – минимальная пожароопасная температура, начиная с которой вещество становится горючим в этой среде,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$K_{бп}$  – коэффициент безопасности к пожароопасной температуре;

$l_{без}$  – определяющий размер горючей среды;

$l_{кр}$  – критический размер;

$d_{кр}$  – критический (гасящий) диаметр;

$K_{бр}$  – коэффициент безопасности к определяющему размеру горючей среды.

Возможность горения горючего аэрозоля, содержащего частицы инертного материала, зависит от содержания горючих и негорючих частиц в единице объёма аэрозоля. Известно, что температура плавления твёрдых инертных частиц выше температуры плавления частиц горючего и температуры горения. Частицы горючего сгорают после их плавления и испарения. Выделяющееся тепло расходуется на газификацию горючего и нагрев зоны реакции до адиабатической температуры горения. Величина НКПР гибридного аэрозоля связана с массовыми концентрациями горючих и инертных частиц.

Температурные пределы распространения пламени – это температура вещества, при которой концентрации его паров в воздухе, находящихся в равновесии с жидкой или твёрдой фазой, равны соответственно нижнему или верхнему концентрационному пределам распространения пламени паров. Температурные пределы воспламенения используют в расчётах безопасных

режимов работы закрытых технологических аппаратов с летучими твёрдыми дисперсными материалами. Безопасной в отношении возможности образования взрывоопасных паровоздушных смесей (при нагревании пылевых отложений) следует считать температур вещества, при которой соблюдаются следующие неравенства:

$$t_{\text{без}} \leq \frac{t_{\text{н}}}{K_{\text{бн}}}, \quad (1.6)$$

$$t_{\text{без}} \geq t_{\text{в}} K_{\text{бв}}, \quad (1.7)$$

где  $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{в}}$  – соответственно нижний и верхний температурные пределы распространения пламени  $^{\circ}\text{C}$ ;

$K_{\text{бн}}$  и  $K_{\text{бв}}$  – коэффициент безопасности к нижнему и верхнему температурным пределам распространения пламени.

Температура тления – температурой тления при самовозгорании называется температура дисперсного вещества, при которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее к возникновению очага тления. Температуру тления необходимо определять при экспертизах причин пожаров для выявления опасных условий кратковременного нагрева веществ и в других случаях [8].

## 1.2 Производство и переработка сахара

Сахар-рафинад производят из тростникового и свекловичного сахара-песка. Вкусовые качества готового продукта из обоих видов сырья идентичны.

Однако производители предпочитают в качестве сырья сахарную свеклу из-за ее низкой стоимости. Сырье для производства сахара имеет желтый цвет и необычный вкус и запах в связи с наличием примесей.

Готовый же продукт должен соответствовать определенным показателям: иметь чистый белый цвет, сладкий вкус, не иметь постороннего привкуса и запаха. После растворения сахара в воде. Она должна оставаться прозрачной.

Таким образом, целью рафинирования является отделение путем многократной кристаллизации сахарозы от примесей. Процесс производства сахара делится специалистами на два этапа: рафинадный и продуктовый.

На первом получают сахар-рафинад, затем несколько раз осуществляется кристаллизация с очисткой сиропов. Каждая операция имеет несколько циклов. В итоге сахароза превращается в рафинад, а примеси остаются в рафинадной патоке.

Количество стадий производства зависит от вида продукта. Производство сахара, из которого изготавливают рафинад, проходит такие стадии:

- мытье, измельчение свеклы;
- выдавливание сока, его очистка, выпаривание;
- приготовление концентрированного сиропа;
- кристаллизация;
- побелка;
- сушка;
- фасовка.

Свеклу моют, нарезают тонкой стружкой. Из стружки с добавлением горячей воды методом диффузии получают сок коричневого цвета, который затем очищают с помощью извести. После повторной очистки на фильтрующем прессе сок приобретает желтоватый цвет.

На следующем этапе сок осветляют сернистым газом. Затем влагу выпаривают, а сироп подают в центрифуги, где производят отделение сахара от патоки. Полученные кристаллы сахара высушивают. После сахар сортируют по размерам кристаллов и упаковывают.

Продукт идет в продажу или на дальнейшую переработку в рафинад. Выход составляет 12-16 % от массы свеклы.

Технология производства сахара рафинада такова. Сахар-песок просеивают и взвешивают. Следующий этап – приготовление сиропа и клерса. Сироп изготавливают из сахара-песка, клерс – из высококачественного сахара-песка и отходов рафинада. Затем сироп фильтруют и очищают от примесей.

Адсорбентами выступают костяной, активный угли. Также сироп очищают путем обработки карборафином, то есть сироп с добавлением угольной суспензии фильтруется через фильтры, на которые нанесен активированный уголь (карборафин).

Такой способ является очень эффективным, так как сироп очищается дважды. Для обесцвечивания используют ионообменные смолы, которые взаимодействуют с сиропом в специальных установках. Обесцвеченный сироп направляют на сгущение в вакуум-аппарат.

Рафинадный утфель варится дольше, чем свеклосахарный. Кроме того, во время уваривания в рафинадный утфель добавляют ультрамарин.

Далее утфель кристаллизуют в мешалках-кристаллизаторах. В центрифугах его отбеливают путем добавки клерса с ультрамарином. Образуется так называемая рафинадная кашка, которую смешивают и просеивают.

Чтобы создать кусковой сахар, кашку прессуют и отправляют для просушки на 8-10 часов в туннельные сушилки.

Литой способ трудоемкий и, следовательно, дорогой, поэтому он почти не применяется производителями. Состоит способ в следующем: сахарную массу разливают в формы и ждут застывания. После этого 3-4 раза массу заливают раствором очищенного сахара для удаления патоки. Затем застывшую субстанцию достают из форм и разрезают на куски.

Готовую продукцию упаковывают для защиты от влаги и загрязнения во время хранения и транспортировки. Тип тары зависит от вида сахара. Тканевые, полиэтиленовые, бумажные мешки используют для хранения сахара-песка.

Рафинад упаковывают в картонные коробки, бумажные пакеты. Сахарная пудра расфасовывается в полиэтиленовые мешки, которые укладывают в коробки. Влажность воздуха при хранении не должна быть выше 70 % для сахарного песка и 80 % для рафинада.

Сушка и упаковка сахара-песка, разделка, сортировка и упаковка сахара-рафинада, производство сахарной пудры являются наиболее опасными в пожарном отношении переделами производства, так как из-за высоких

концентраций сахарной пыли возможны не только возгорания, но и взрывы. Производство сахара-рафинада более пожароопасно, чем свеклосахарное производство, так как сырьем для него служит сахар-песок, а не свекла или сырец.

Производство сахара характеризуется высокой взрыво- и пожаро-опасностью. Сам сахар является горючим веществом, взвешенная в воздухе производственных помещений пыль сахара взрывоопасна, осевшая сахарная пыль пожароопасна, она сильно электризуется. В технологическом процессе используются такие опасные вещества, как формалин, сера, кислоты; выделяются аммиак, водород, оксид углерода, диоксид серы. Горючими веществами являются сухой свекловичный жом и его пыль, а также используемые при затаривании упаковочные материалы. Для очистки рафинадных сиропов в качестве адсорбентов применяются костяной и активированный уголь. Пожароопасные свойства веществ, встречающихся в сахарном производстве, приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики взрыво- и пожароопасных веществ сахарного производства

Вещество	Температура, °С			Нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПРП)	
	Вспышки	Воспламенения	Самовоспламенения	% от объема	г/м <sup>3</sup>
Оксид углерода	-	-	-	12,5	-
Аммиак	-	650	-	15,5	-
Водород	-	510	-	4,0	-
Формалин	67	-	435	6,0	-
Сахар	-	470-500	540	-	-
Сахарная пудра	-	335	395	-	42,5
Жом свекловичный	-	230-300	435-700	-	27,7-40,0
Пыли:					
сахарная, I	-	470	350	-	8,0-8,9
угольная, II	-	-	-	-	40,0
серная, I	-	207	232	-	2,3
древесная, IV	-	250	275	-	Свыше 65
Древесина	-	250	400	-	-
Картон	-	258	427	-	-

Сахарная пыль при относительной влажности воздуха свыше 70% не воспламеняется, поэтому ряд технологических операций, вплоть до выхода

сахара-сырца из продуктового отделения, не представляет пожарной опасности. Исключение составляют диффузионные батареи, где для дезинфекции используется формалин; выпарная станция, при выварке которой выделяется водород; серные печи, предназначенные для выработки сульфитационного газа, обжиг известняка и сушка жома.

### 1.3 Методы, используемые при оценке пожаровзрывоопасности пылей

Некоторые технологические процессы в химической, нефтехимической, медицинской и других отраслях промышленности связаны с получением или переработкой твёрдых дисперсных материалов, способных к выделению мелких твёрдых частиц – пылей. Принципы обеспечения пожаровзрывобезопасности производств, в которых образуются горючие пыли, впервые в отечественной практике были сформулированы в монографии М.Г. Годжелло. Затем эти принципы были зафиксированы в Государственном стандарте. Они основаны на предотвращении образования горючей среды, ограничении воспламеняемости и горючести веществ и предотвращении образования в горючей среде (или внесения в неё) источников зажигания.

Для практической реализации условий пожаровзрывобезопасности необходимо располагать количественными показателями пожаровзрывоопасности веществ и материалов, используемых в технологических процессах.

Понятие «промышленные пыли» включает в себя относительно тонкие дисперсии ископаемых топлив, металлов, химических органических продуктов (пластмасс, красителей, лекарственных препаратов и др.), сельскохозяйственных продуктов (сахар, пшеница и др.) и т.д. Эти вещества различной химической природы неодинаково ведут себя при горении, однако условия их зажигания, распространения пламени по их аэрозолям и условия подавления горения подчиняются одним и тем же закономерностям. Поэтому испытания на пожарную опасность всех этих веществ проводят по одинаковым методикам. В настоящее время получили развитие методы расчетно-аналитического определения степени

пожаровзрывоопасности пылей, исходы из их состава, теплоты сгорания и других физико-химических свойств [14].

В разных странах разработаны и официально утверждены методики лабораторных испытаний промышленных пылей на пожаровзрывоопасность. Эти методики имеют существенные различия, так как создавались независимо одна от другой, а международная стандартизация их не проведена. Наряду с отличиями, методики, принятые в разных странах, имеют также общие черты. В частности, они предусматривают оценку опасных свойств на небольших образцах пыли в установках объёмом в несколько литров. Массовые испытания проводятся главным образом в лабораторных условиях. При таком подходе затраты времени на испытания сводятся к минимуму, а безопасность проведения экспериментов обеспечивается максимально даже в тех случаях, когда пыль токсична, или имеет другие необычные свойства. Испытания на пожаровзрывоопасность преследует цель быстрой и объективной оценки новых материалов, смесей ранее изученных веществ и традиционных веществ при изменении технологии их получения.

При оценке пожаровзрывоопасности взвешенной пыли определяют нижний концентрационный предел распространения пламени, минимальную энергию зажигания, максимальное взрывоопасное содержание кислорода. Оценка пожаровзрывоопасности отложенной пыли заключается в определении группы горючести, температур воспламенения, самовоспламенения и тления, температурных условий теплового самовозгорания. При исследовании дисперсных веществ с низкой температурой плавления дополнительно определяют температуру вспышки и температурные пределы распространения пламени. Рассмотрим сущность показателей, характеризующих пожаровзрывоопасность промышленных пылей и область практического использования этих показателей.

Максимальное давление взрыва – наибольшее давление возникающее при дефлаграционном взрыве пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,325 кПа. Максимальное давление взрыва используют в расчётах технологического оборудования на взрывоустойчивость и

в расчётах предохранительных мембран. Выполняя эти расчёты, необходимо учитывать возможность перехода дефлаграционного горения в детонацию в результате турбулизации и попадания горящих частиц в свежую смесь, а также возможность повышения давления взрыва из-за предварительного сжатия ещё несгоревшей смеси при распространении взрыва по технологическому оборудованию и коммуникациям. При дефлаграционном горении максимальное давление взрыва пропорционально начальному давлению.

Скорость нарастания давления при взрыве – отношение приращения давления, развиваемого при взрыве в замкнутом сосуде, к интервалу времени, в течение которого это приращение произошло. Различают среднюю и максимальную скорости нарастания давления при взрыве. При определении средней скорости в качестве приращения давления принимают разность между максимальным давлением взрыва и начальным давлением в сосуде до взрыва, а при определении максимальной скорости – приращение давления на прямолинейном участке зависимости давления взрыва от времени. Значения скорости нарастания давления при взрыве используют в расчётах систем взрывоподавления и при расчётах предохранительных устройств.

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК) – минимальная концентрация кислорода в горючей смеси, ниже которой воспламенение и горение смеси становятся невозможными при любой концентрации горючего в смеси. Значения МВСК для одной и той же пыли зависят от вида флегматизатора. Концентрация флегматизатора в смеси воздуха с флегматизатором, соответствующая минимальному взрывоопасному содержанию кислорода, называется минимальной флегматизирующей концентрацией. Значение МВСК учитывают при расчётах взрывопожаробезопасных режимов работы технологического оборудования, пневмотранспорта, при разработке систем и установок взрывоподавления и тушения пожаров.

Методы оценки пожаровзрывоопасности пылей, принятые в США, были разработаны в Горном бюро. Они предусматривают испытания пылей в осевшем

и взвешенном состоянии с применением различных источников зажигания и различных устройств для образования аэрозолей.

Для пылей в осевшем состоянии определяют температуру самовоспламенения и минимальную энергию зажигания, во взвешенном – температуру самовоспламенения, нижний концентрационный предел распространения пламени, минимальную энергию зажигания, относительную горючесть и относительную воспламеняемость, максимальное давление взрыва и скорость его нарастания, минимальное взрывоопасное содержание кислорода.

На первом этапе образец пыли рассеиваются на сите 200 (диаметр ячейки 74 мк) и на испытания берут фракцию прошедшую через сито. В тех случаях, когда влажность пыли превышает 5 % (масс.), её предварительно высушивают. До начала испытаний пыль исследуют под микроскопом и, в случае необходимости, определяют физико-химические свойства. На основании результатов определения показателей пожаровзрывоопасности взвешенной в воздухе пыли вычисляют безразмерные параметры, характеризующие воспламеняемость, силу взрыва и индекс взрывоопасности, равных произведению двух первых [14].

Лёгкость воспламенения и взрывоопасность вычисляют из сравнения характеристик горения излучаемого вещества с характеристиками горения «стандартной» пыли, в качестве которой выбрана пыль Питтсбургского угля.

Индекс взрывоопасности связан со степенью взрывоопасности, как показана в таблице 1.2.

Таблица – 1.2 Зависимость степени опасности пыли от индекса взрывоопасности

Относительная степень взрывоопасности	Легкость воспламенения	Взрывоопасность	Индекс взрывоопасности
Слабая	0,2	0,5	0,1
Умеренная	0,2 – 1,0	0,5 – 1,0	0,1 – 1,0
Высокая	1,0 – 5,0	1,0 – 2,0	1,0 – 10
Очень высокая	5,0	2,0	10

Индекс взрывоопасности, превышенной 1,0, свидетельствует о том, что опасность исследуемого вещества превышает опасность угольной пыли Питтсбургского месторождения, лежащую на границе, разделяющей пыли высокой и умеренной опасности. Система «индексов взрывоопасности» не имеет научного обоснования, она разработана на эмпирической основе.

Создание метода индексов – попытка свести оценку степени пожаровзрывоопасности аэрозолей к сравнению численных значений безразмерных параметров. Однако данные об адекватности этого метода реальной опасности аэрозолей в промышленности в научно-технической литературе отсутствуют [14].

М.Г. Годжелло предложил классифицировать промышленные пыли по степени пожаровзрывоопасности с учётом их взрыво- или невзрывоопасности в состоянии аэрозоля и с учётом пожароопасности в состоянии аэрогеля. При этом он исходил из возможности определения взрывоопасности по величине нижнего предела распространения пламени, а пожароопасности – по величине температуры самовоспламенения отложенной пыли. В соответствии с этими представлениями все промышленные пыли были разделены на четыре класса.

I класс – наиболее взрывоопасные пыли с нижним пределом распространения пламени  $15 \text{ г/м}^3$  и ниже.

II класс – взрывоопасные пыли с нижним пределом распространения пламени от 16 до  $65 \text{ г/м}^3$ .

Пыли с нижним пределом распространения пламени выше  $65 \text{ г/м}^3$  отнесены к III и IV классам. Разделение внутри них производится следующим образом.

III класс – наиболее пожароопасные пыли с температурой самовоспламенения (в осевшем состоянии) не выше  $250^\circ\text{C}$ .

IV класс – пожароопасные пыли с температурой самовоспламенения (в осевшем состоянии) выше  $250^\circ\text{C}$ .

Разработанная М.Г. Годжелло классификация пылей до настоящего времени используется в нормативных документах, регламентирующих уровень

пожаровзрывоопасности производств. В соответствии со строительными Нормами и Правилами к взрывопожароопасным производствам категории Б относятся производства, в которых имеются горючие пыли или волокна с нижним концентрационным пределом распространения пламени  $65 \text{ г/м}^3$  и менее, если из них могут образовываться взрывоопасные смеси в объёме, превышающие 5% объёма воздуха в помещении. К пожароопасным производствам категории В относятся те, в которых имеются горючие пыли с нижним концентрационным пределом распространения пламени более  $65 \text{ г/м}^3$ .

В таблице 1.3 приведены нижние концентрационные пределы распространения пламени (в  $\text{г/м}^3$ ) взрывоопасных аэрозолей некоторых веществ, отнесённых к I и II классам по данным М.Г. Годжелло:

Таблица – 1.3 нижние концентрационные пределы распространения пламени (в  $\text{г/м}^3$ ) взрывоопасных аэрозолей некоторых веществ, отнесённых к I и II классам по данным М.Г. Годжелло.

I класс		II класс	
Сера	2,3	Алюминий	58,0
Нафталин	2,5	Горох	25,2
Канифоль	5,0	Жом свекловичный	27,7
Шрот подсолнечный	7,6	Кукуруза	37,8
Молоко сухое	7,6	Крахмал картофельный	40,3
Сахар свекловичный	8,9	Лигнин	30,2
Камфора	10,1	Льняная костра	16,7
Чечевица	10,1	Овес	30,2
Мясокостная мука	10,1	Ячмень	32,8

В настоящее время НКПР многих веществ, приведённых выше, уточнены. Однако отнесение всех указанных пылей к классу взрывоопасных не вызывает сомнений.

Классификация пылей по степени пожаровзрывоопасности многократно подвергалась критике. В частности, в работе предложено в дополнение к нижнему

концентрационному пределу распространения пламени использовать значения скорости нарастания давления взрыва и сократить число групп пожаровзрывоопасности до трёх: I – наиболее взрывоопасное поле пыли, II – взрывоопасные, III – пожароопасные. НКПР для всех групп принят  $65 \text{ г/м}^3$ .

Для отнесения пылей к I группе достаточно определить НКПР. Если он не превышает  $65 \text{ г/м}^3$ , то пыль классифицируется как наиболее взрывоопасная. При НКПР больше  $65 \text{ г/м}^3$  дополнительно измеряют скорость нарастания давления взрыва и по этой величине пыли подразделяют на взрывоопасные или пожароопасные, Практического применения это предложение не нашло [8].

I класс – пылевидные вещества, которые легко воспламеняются и распространяют пламя. При этом источник зажигания, инициирующий горение, может быть очень малым.

II класс – пылевидные вещества, которые легко воспламеняются с возникновением пламени, но для этого требуется мощный источник зажигания.

III класс – пылевидные вещества, которые не воспламеняются во время их испытания.

Для определения концентрационных пределов распространения пламени зажигают газо-, паро- или пылевоздушную смесь с заданной концентрацией исследуемого вещества в объёме реакционного сосуда и устанавливают факт наличия или отсутствия распространения пламени. Изменяя концентрацию горючего в смеси, находят её минимальное и максимальное значение, при которых происходит распространения пламени.

Длительное время пределы распространения пламени газов измеряли в установке КП, реакционной камерой в которой служила вертикальная стеклянная трубка диаметром 50 – 55 мм и высотой 1500 мм. Схема этой установки показана на рисунке 1.1. Нижняя часть трубки закрывается пришлифованной стеклянной пластинкой. В реакционный сосуд на расстоянии 100 мм от его нижнего конца введены на шлифах электроды с наконечниками, изготовленными из молибденовой проволоки. Разрядный промежуток между электродами составляет 8 мм [14].

Предварительно рассчитывают нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени по газо-, паровоздушным смесям исследуемого вещества по формуле, %

$$\varphi_{л} = \frac{100}{a_{м} \cdot \beta + b_{м}}, \quad (1.8)$$

$$\beta = m_{с} + m_{s} + \frac{m_{н} - m_{х}}{4} - \frac{m_{о}}{2} + 2,5m_{р}, \quad (1.9)$$

где  $m_{с}$  – число атомов углерода в молекуле соединения;

$m_{s}$  – число атомов серы в молекуле соединения;

$m_{н}$  – число атомов водорода в молекуле соединения;

$m_{х}$  – число атомов галогена в молекуле соединения;

$m_{р}$  – число атомов фосфора в молекуле соединения;

$m_{о}$  – число атомов кислорода в молекуле соединения;

$a_{м}$  и  $b_{м}$  – универсальные константы, значения которых приведены в таблице

1.4.

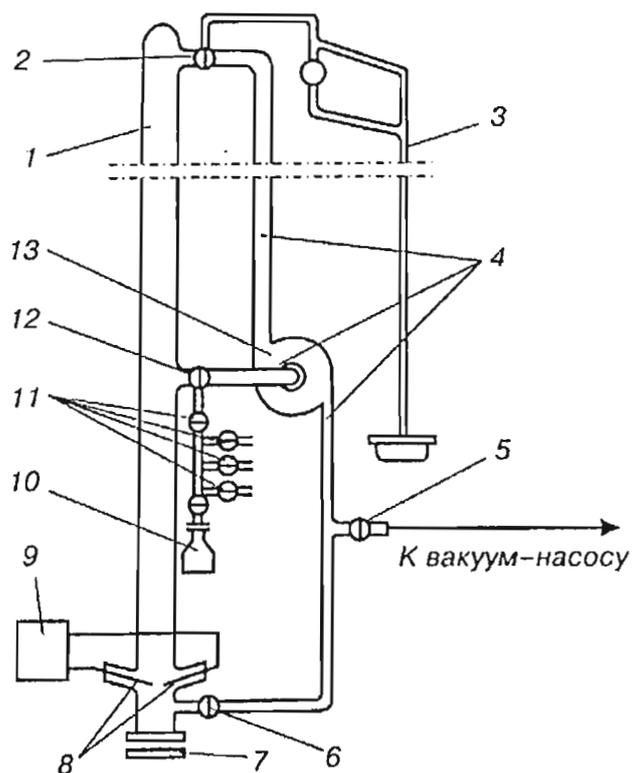


Рисунок 1.1 – Установка КП

1 – реакционный сосуд; 2, 5, 6, 11, 12 – краны; 3 – ртутный манометр; 4 – циркуляционные трубки; 7 – стеклянная пластина; 8 – электроды зажигания; 9 – высоковольтный источник питания; 10 – испаритель; 13 – насос мешалка.

Таблица 1.4 – Значения постоянных  $a_m$  и  $b_m$  в формуле 1.8

Предел распространения пламени	$a_m$	$b_m$
Нижний	8,684	4,679
Верхний при $\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
при $b > 7,5$	0,768	6,554

Нижний концентрационный предел распространения пламени НКРП в пылевоздушных смесях в нашей стране в течение длительного времени измеряли в установке, разработанной М.Г. Годжелло. Взрывная камера этой установки представляла собой толстостенный замкнутый металлический цилиндр с внутренним диаметром 105 мм и высотой 425 мм. Источником зажигания служила расположенная в нижней части взрывной камеры нагретая до 900 °С керамическая пластина. Распространение пламени по пылевоздушной смеси идентифицировалось по скачку давления, регистрируемому тензометрическим датчиком в комплекте со шлейфовым осциллографом. В середине 70-х годов металлическая взрывная камера в установке М.Г. Годжелло была заменена на стеклянный сосуд (тех же размеров) с прозрачными стенками, усовершенствовано распылительное устройство и в качестве источника зажигания применена накаливаемая до 900 °С нихромовая спираль. При проведении опытов факт распространения пламени по пылевоздушной смеси фиксировался визуально и с помощью киносъемки. Схема этой установки приведена на рисунке 1.2 [14, 4].

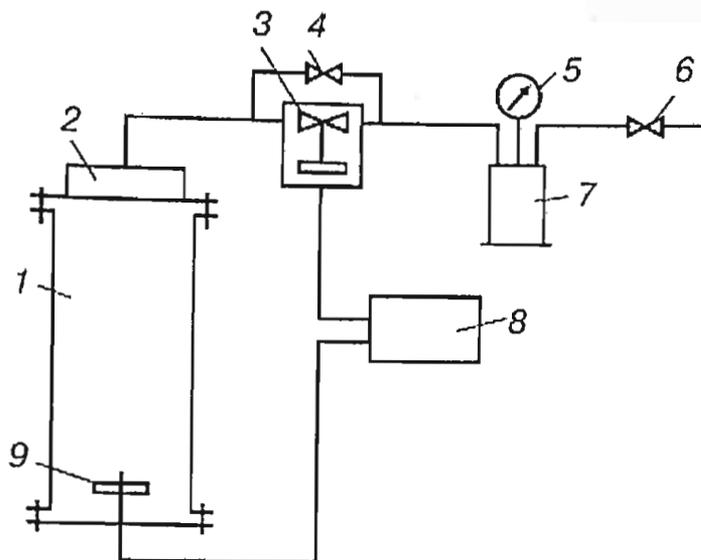


Рисунок 1.2 – установка для измерения нижнего концентрационного предела распространения пламени в пылевоздушных смесях

1 – реакционный сосуд; 2 – распылитель; 3 – электромагнитный клапан; 4, 6 – клапаны; 5 – манометр; 7 – ресивер; 8 – блок управления; 9 – источник зажигания

Реакционный сосуд этой установки представляет собой стеклянный цилиндр внутренним диаметром 105 мм и высотой 425 мм. Цилиндр имеет контрольную отметку на высоте 300 мм и закреплен вертикально между двумя металлическим фланцами.

Методика измерения заключается в следующем. Взвешивают навеску исследуемого вещества, затем помещают навеску в распылитель и герметизируют реакционный сосуд. Подают в ресивер воздух до требуемого давления, устанавливают на блоке продолжительность распыления, включают источник зажигания и распыляют навеску, визуально фиксируют распространения пламени.

Для определения максимального давления взрыва зажигают газо-, паро- или пылевоздушную смесь заданной концентрации в объеме реакционного сосуда и фиксируют развивающееся при воспламенении горючей смеси давление взрыва. Изменяя концентрацию горючего в смеси, выявляют максимальное давление взрыва. Для определения скорости нарастания давления при взрыве находят максимальную скорость изменения давления, возникающего в объеме реакционного сосуда при взрыве газо-, паро- или пылевоздушных смесей заданного состава.

Определение максимального давления взрыва и скорости нарастания давления при взрыве газов и паров жидкостей выполняют на установке, схема которой представлена на рисунке 1.3 [14].

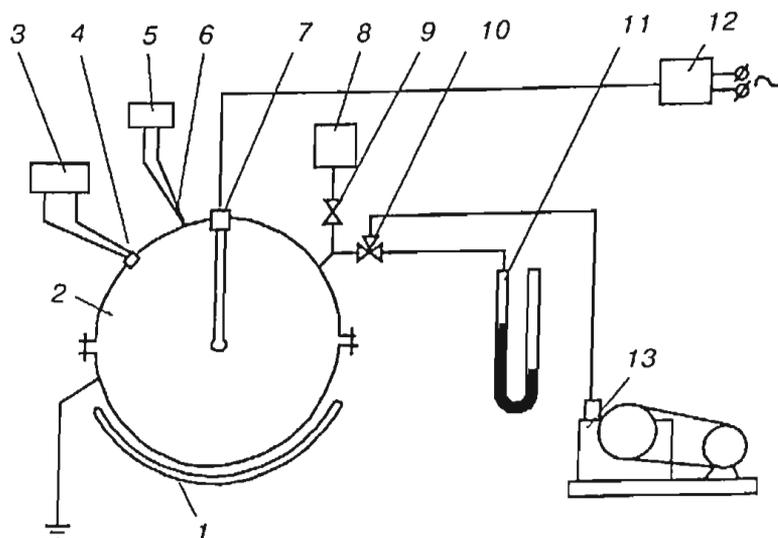


Рисунок 1.3 – установка для определения максимального давления взрыва и скорости нарастания давления при взрыве газов и паров жидкостей

1 – термостатируемый электронагреватель; 2 – реакционный сосуд; 3 – осциллограф; 4 – датчик давления; 5 – потенциометр; 6 – термопара; 7 – источник зажигания; 8 – смеситель; 9, 10 – краны; 11 – ртутный манометр; 12 – источник питания; 13 – вакуумный насос

Реакционный сосуд вместимостью 4 дм<sup>3</sup> представляют собой две соединенные фланцами полусферы. Нижняя полусфера имеет термостатируемый электронагреватель для проведения испытаний при повышенной температуре с легкоконденсируемыми парами жидкостей. Реакционный сосуд должен быть рассчитан на давление, которое не менее чем в два раза превышает максимальное давление взрыва испытуемых смесей. Датчик давления имеет верхний предел измерения до 1000 кПа. Показания датчика давления фиксируются электроннолучевым осциллографом. Термопара типа ТХА поверхностная, обыкновенная, средне инерционная, с электродами диаметром 0,5 мм. Потенциометр типа КСП-4 с градуировкой ХА имеет диапазон измерения температур от 0 до 400 °С. В качестве источника зажигания используют электроды с разрядным промежутком 5 мм или электрическую спираль.

Разрядный промежуток электродов приходится на центр реакционного сосуда. От источника питания на зажигающее устройство подается напряжение: 3 кВ на электроды, 36 В на спираль. Выделяемая энергия искр на электродах при длительности разряда 1 – 2 с составляет 30 – 40 Дж, температура накаленной спирали 1100 °С. Смеситель для приготовления газо-, паровоздушной смеси снабжен встроенной мешалкой с электроприводом и штуцерами для подвода газов и крепления манометра. Смеситель через кран сообщается с реакционным сосудом. Ртутный манометр с ценой деления 0,1 кПа соединен через трехходовой кран с реакционным сосудом. Вакуумный насос обеспечивает остаточное давление не более 0,6 кПа [14].

Перед проведением испытаний установку проверяют на герметичность. Тарируют систему измерения давления подачей воздуха в реакционный сосуд до давления 1000 кПа с интервалом 50 кПа, а затем сбрасыванием давления до нуля через те же интервалы, фиксируя весь процесс осциллографом. По данным, снятым с осциллограммы, строят тарировочный график зависимости отклонения луча осциллографа от приращения давления, который должен представлять собой прямую линию. Рассчитывают стехиометрическую концентрацию исследуемого вещества. Для первого испытания количество исследуемого вещества принимают равным 70 % от рассчитанной стехиометрической концентрации.

Для приготовления газо-, паровоздушной смеси требуемого состава смеситель вакуумируют до остаточного давления 0,5 кПа и затем поочередно подают в него компоненты смеси по парциальным давлениям. После впуска компонентов включают мешалку и перемешивают смесь в течение 6 минут. Реакционный сосуд вакуумируют до остаточного давления 0,5 кПа, перепускают в него из смесителя заготовленную газо-, паровоздушную смесь, перекрывают краны и зажигают смесь искрой или спиралью. Результаты испытания регистрируются осциллографом. После взрыва сбрасывают избыточное давление в атмосферу, два – три раза вакуумируют реакционный сосуд для удаления газообразных продуктов горения. Определение максимального давления взрыва состоит из предварительных и основных испытаний. В серии предварительных

испытаний находят зависимость давления взрыва от концентрации газа (пара) в смеси. Газо-, паровоздушную смесь, соответствующую максимуму этой зависимости, принимают за оптимальную [14].

В основных испытаниях проводят серию из десяти испытаний с оптимальной газо-, паровоздушной смесью и две серии из десяти испытаний со смесями, отличающимися от оптимальной на 1 – 2 % в большую и меньшую сторону. За величину максимального давления взрыва исследуемой газо-, паровоздушной смеси принимают наибольшее значение давления взрыва, полученное в трёх сериях основных испытаний.

В первом разделе изучены взрывопожароопасные свойства пылей, производство и переработка сахара, экспериментальные методы по определению максимального давления взрыва и скорости нарастания давления, нижний концентрационный предел распространения пламени НКРП в пылевоздушных смесях [14].

## 2 ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Объекты исследований

В качестве объекта исследовали (изучали) сахар-песок по ГОСТ 21-94 «Сахар-песок». Технические условия с размерами кристаллов от 0,2 до 2,5 мм. Органолептические показатели сахар-песок представлены в таблице 2.1 [6].

Таблица 2.1 – Органолептические показатели сахар-песка

Наименование показателя	Характеристика для		Метод испытания
	сахара-песка	сахара-песка для промышленной переработки	
Вкус и запах	Сладкий, без посторонних привкуса и запаха, как в сухом сахаре, так и в его водном растворе		По ГОСТ 12576
Сыпучесть	Сыпучий	Сыпучий, допускаются комки, разваливающиеся при легком нажатии	То же
Цвет	Белый	Белый с желтоватым оттенком	" "
Чистота раствора	Раствор сахара должен быть прозрачным или слабо опалесцирующим, без нерастворимого осадка, механических или других посторонних примесей		

Физико-химические показатели сахар-песка представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Физико-химические показатели

Наименование показателя	Норма для		Метод испытания
	сахара-песка	сахара-песка для промышленной переработки	
Массовая доля сахарозы (в пересчете на сухое вещество), %, не менее	99,75	99,55	по ГОСТ 12571
Массовая доля редуцирующих веществ (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,050	0,065	по ГОСТ 12575
Массовая доля золы (в пересчете на сухое вещество), %, не более	0,04	0,05	по ГОСТ 12574
Цветность, не более:			
условных единиц	0,8	1,5	по ГОСТ 12572
единиц оптической плотности (единиц ICUMSA)	104	195	то же
Массовая доля влаги, %, не более	0,14	0,15	по ГОСТ 12570
Массовая доля ферропримесей, %, не более	0,0003	0,0003	по ГОСТ 12573
Примечания:			
<p>1. Сахар-песок для производства молочных консервов, продуктов детского питания и биофармацевтической промышленности должен соответствовать требованиям, указанным для сахара-песка.</p> <p>2. Для промышленной переработки на рафинадных заводах допускается сахар цветностью не более 1,8 условных единиц или 234 единицы оптической плотности.</p> <p>3. Величина отдельных частиц ферропримесей не должна превышать 0,5 мм в наибольшем линейном измерении.</p> <p>4. В сахаре-песке для промышленной переработки на рафинадных заводах массовая доля ферропримесей не регламентируется.</p> <p>5. Массовая доля влаги сахара-песка, упакованного в мягкие специализированные контейнеры, и сахара-песка, предназначенного для длительного хранения, при отгрузке должна быть не более 0,10%.</p>			

Таблица 2.3 – фракционный состав сахар-песка и сахарной пудры

Размер фракции, %							
Сахар-песок				Сахарная пудра			
1,0	0,5	0,2	0,14	0,1	0,08	0,05	>0,05
7	72	19	2	70	15	9	6

## 2.2 Методы исследований

### 2.2.1 Метод размола сахар-песка на шаровой мельнице

Мельницы лабораторные шаровые предназначены для сухого или мокрого помола с помощью мелющих тел проб материалов твердостью до 7 ед. по шкале Мооса. Возможно использование в условиях лаборатории или небольшого производства. Оснащаются лабораторные мельницы барабанами емкостью от 1 до 16 литров и частотным регулятором. Шаровые лабораторные (барабанно-валковые) мельницы можно использовать для моделирования процессов размола различного сырья в промышленных шаровых мельницах мокрого или сухого помола или для помола небольших партий материала.

Для размола сахар-песка использовали лабораторную шаровую мельницу на рисунке 2.1 [1].



Рисунок 2.1 – лабораторная шаровая мельница

*Принцип работы.* Лабораторная барабанная (барабанно-валковая) шаровая мельница изготавливается в двух вариантах: напольном (МШЛ-1П) или настольном (МШЛ-1С). Конструктивно прибор представляет собой раму

валов мельницы является приводным, он жестко закреплен на раме мельницы и связан с двигателем посредством клиновидного ремня. Второй вал свободно вращается в подшипниковых опорах. Привод вала осуществляется электрическим двигателем мощностью 0,25-0,55 кВт через клиновой ремень. Ремень используется стандартный, его можно купить для замены в любом магазине РТИ. Приводной вал передает вращательное движение размольному барабану. В зависимости от диаметра барабана, расстояние между валами подлежит регулировке. На одном из валов закреплены упорные ролики для предотвращения осевого смещения барабана во время вращения. Кроме того, до начала размла рекомендуется выставить привод по уровню относительно поверхности пола. Для этой цели на приводе мельницы шаровой лабораторной установлены регулируемые опоры.

Для помола материала в барабан закладываются мелющие тела в форме шаров из уралита или нержавеющей стали ШХ-18 диаметром от 10-и до 30мм. Диаметр шаров и их количество рассчитываются исходя из объема барабана. По выбору заказчика мельницы лабораторные комплектуются фарфоровыми (уралитовыми), стальными (конструкционная сталь Ст-3) или выполненными из «пищевой» нержавеющей стали (12х18н10т) размольными барабанами объёмом 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16л (дм<sup>3</sup>). Барабаны из стали Ст-3 и нержавеющей стали вырезаются на токарном станке из монолитной болванки и имеют толщину стенок и днища 5-12мм. Заполнение мелющими телами, измельчаемым продуктом и (или) жидкостью осуществляется непосредственно в зафиксированный в вертикальном положении барабан, после чего он закрывается крышкой через прокладку. Крышка имеет надежный и герметичный механизм запираения.

Мельница лабораторная работает по тому же принципу, что и большие промышленные мельницы сухого или мокрого помола, используя ударно-истирающее воздействие мелющих тел и стенок размольного барабана на измельчаемый материал.

*Процесс помола.* Непосредственно, сам процесс помола происходит во время вращения заполненного материалом, мелющими телами и (или) жидкостью размольного барабана.

1. Установив размольный барабан в вертикальное положение, загрузить измельчаемый материал и мелющие тела (шары), и, в случае мокрого помола, жидкость.

2. Установить барабан на валки мельницы и включить привод частотным регулятором на время достаточное для помола.

3. Выключить привод, снять барабан с валков и взять небольшое количество измельчаемого материала для анализа. Если размер измельченных частиц удовлетворяет Вашим требованиям, то освободить барабан от мелющих тел и материала просеив через сито нужного номера. Помол можно оптимизировать строго соблюдая пропорцию заполнения: 28-45% - мелющие тела, 28-45% - перемалываемый материал и (или) жидкость. Оставшийся объем должен оставаться незаполненным для обеспечения свободного ударно-стирающего действия мелющих тел. При соблюдении этих пропорций максимально оптимизируется время помола, расход электроэнергии и износ расходных материалов. Технические характеристик лабораторной мельницы МШЛ-1 представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Технические характеристики лабораторной мельницы МШЛ-1

Характеристика	Значение
Число оборотов лабораторной мельницы, об/мин	регулируется при помощи частотного регулятора
Установленная мощность двигателя, кВт	0,55
Напряжение, В	220
Максимальная емкость барабана, л	до 16
Рабочая длина валов, мм	740
Диаметр валов, мм	32
Наименьшая фракция после помола, микрон	7,0
Количество барабанов устанавливаемых на мельницу, шт.	1, 2 или 3, в зависимости от размеров (объема) барабана
Габаритные размеры, мм (напольный вариант) МШЛ-1П	750 x 400 x 365

## 2.2.2 Метод определения удельной поверхности порошков на приборе ПСХ-10А.

Для определения удельной поверхности материала использовали прибор ПСХ-10А рисунок 2.2.



Рисунок 2.2 – Измеритель удельной поверхности и среднемассового размера частиц порошков

При помощи прибора ПСХ-10А осуществляется контроль качества строительных, металлургических и других порошкообразных материалов - минеральных и органических пигментов, гипса, извести, известняка, а также электродов, лекарственных вспомогательных веществ, катализаторов и т.д. В приборах дисперсионного анализа серии ПСХ использован общепринятый в мировой практике метод газопроницаемости Козени и Кармана. Газопроницаемость слоя порошка определяют по продолжительности фильтрации через него воздуха при фиксированном начальном и конечном разрежении в рабочем объеме прибора. Для расчета удельной поверхности и среднего размера частиц используют удельный вес – плотность ( $D_n=850 \text{ г/м}^3$ ) материала порошка, массу порошка и высоту его слоя в кювете [1].

В приборе ПСХ-10А измерения и расчеты газопроницаемости, удельной поверхности и среднемассового размера частиц порошков выполняются под управлением процессора, работающего по специально созданной программе. Используются встроенный таймер и высокоточный безинерционный электронный датчик давления. Специальный термодатчик измеряет температуру фильтруемого воздуха, которая автоматически учитывается в расчете его вязкости и,

соответственно, в измерениях газопроницаемости и удельной поверхности порошков. Эти устройства значительно сокращают длительность и повышают точность результатов анализа, уменьшают погрешности субъективного характера, обусловленные участием оператора в выполнении измерений и расчетов. Технические характеристики прибора представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики

Диапазон измеряемых величин: удельная поверхность среднемассовый размер частиц порошков	см <sup>2</sup> /г мкм	300 - 60000 0,2 - 200
Точность измерений	%	±1,5
Повышенная точность измерений в диапазоне:	см <sup>2</sup> /г	300 – 1000
Продолжительность измерения, менее	мин	2
Потребляемая мощность (220 В/50 Гц), менее	Вт	0,3
Диапазон рабочих температур	°С	10 - 35
Относительная влажность, не более	%	80
Габариты по типоразмерам корпуса: 1 типоразмер, 2 типоразмер	мм	300 x 280 x 110 170 x 280 x 110
Масса прибора с кюветой и пробойником, не более	кг	3

Прибор ПСХ-10А включает:

- кювету с плунжером для размещения в ней исследуемого порошка;
- пробойник для вырезания фильтров-вкладышей.
- соединительный воздушный шланг;
- эталонный порошок для периодического оперативного контроля и поверки прибора.

Кювета оснащена специальной линейкой для измерения высоты слоя порошка. Кювета поставляется в одной из двух модификаций: с измерительной линейкой с нониусом, или с измерительной линейкой с круговой шкалой.

### 2.2.3 Ситовой анализ

Ситовой Анализ (ситовый анализ), определение гранулометрического или фракционного состава измельченных сыпучих материалов; разновидность дисперсного анализа. Ситовой анализ применим для материалов с размерами частиц (зерен) 0,05-10 мм; для анализа крупнозернистых и кусковых материалов используют, как правило, грохочение [1].

Ситовой анализ осуществляют просеиванием проб материала через набор стандартных сит с обычно квадратными, реже прямоугольными отверстиями, размер которых последовательно уменьшается сверху вниз. В результате материал разделяется на классы, или фракции, в каждой из которых частицы незначительно различаются размерами. При просеивании часть материала, размеры частиц которого меньше размера отверстий  $d$ , проходит через сито (фракция- $d$ , или проход), а оставшая часть с более крупными частицами остается на сите (фракция  $+d$ , остаток, или сход). Число фракций, получаемых при просеивании через набор из  $n$  сит, составляет  $n + 1$  и не должно быть менее 5 и более 20.

При ситовой классификации сыпучего материала применяются сита, которые согласно ГОСТ 3584-53, обозначаются номерами, соответствующими размеру ширины отверстия в свету, выраженному в миллиметрах. Стандартный набор сит для рассеивания характеризуется постоянным отношением (моделей) размер отверстий каждого последующего сита к предыдущему, равным  $\sqrt[4]{2}$ ,  $\sqrt{2}$ , 2,  $2^2$  и т.д.

Классы зерен или фракции обозначают размерами отверстий этих сит, соответствующих размерам гранул данного класса.

По данным ситового анализа рассчитывается:

- средний диаметр зерен фракции:

$$d_{\text{ср}} = \frac{d_n + d_{n+1}}{2}, \quad (2.1)$$

- средневзвешенный размер всей смеси:

$$d_{\text{ср.взв}} = \frac{c_1 \cdot d_1 + c_2 \cdot d_2 + \dots + c_n \cdot d_n}{c_1 + c_2 + \dots + c_n}, \quad (2.2)$$

- среднегармонический размер всей смеси:

$$d_{\text{ср.гарм}} = \frac{c_1 + c_2 + \dots + c_n}{\frac{c_1}{d_1} + \frac{c_2}{d_2} + \dots + \frac{c_n}{d_n}}, \quad (2.3)$$

где  $n$ - размер сита одной из фракций, мм;

$d_1, d_2, \dots, d_n$ - средний размер каждой из фракций, мм;

$c_1, c_2, \dots, c_n$  - выход фракции.

Ситовый анализ сыпучих материалов производится вручную на стандартных ситах с модулем равным 2. Размеры сит в этом наборе: 8 – 4 – 2 – 1 – 0,5 – 0,25 – 0 мм на рисунке 2.3.

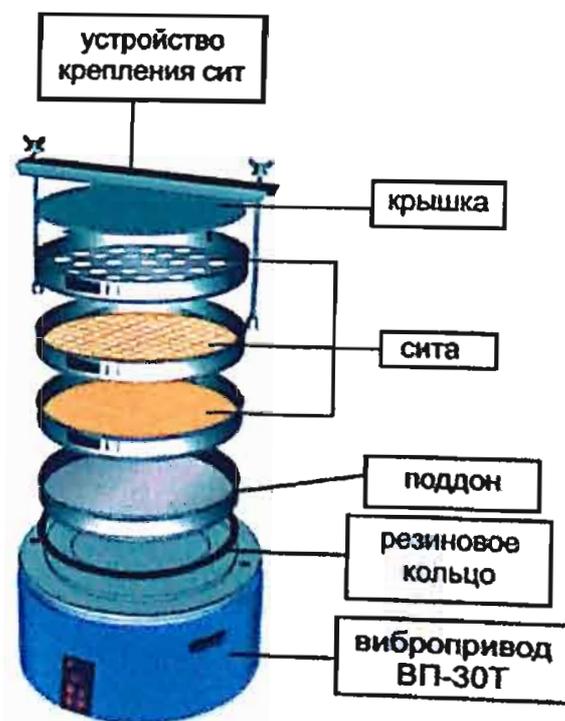


Рисунок 2.3 – набор сит с ВП-30Т

Массовую долю остатка на сите  $X$ , %, вычисляют по формуле

$$X = \frac{m_1 * 100}{m}, \quad (2.4)$$

где  $m_1$  – масса остатка на сите, г;

$m$  – масса навески препарата, г.

За результат анализа принимают среднее арифметическое значение результатов двух параллельных определений, абсолютное расхождение между которыми не превышает допускаемое расхождение, равное 0,1 %. Допускаемая абсолютная суммарная погрешность результата анализа  $\pm 0,02$  % при доверительной вероятности  $P=0,95$ .

#### 2.2.4 Определение максимального давления взрыва

Максимальное давление взрыва – наибольшее избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа.

Сущность метода определения максимального давления взрыва заключается в зажигании газо-, паро- и пылевоздушной смеси заданного состава в объеме реакционного сосуда и регистрации избыточного развивающегося при воспламенении горючей смеси давления. Изменяя концентрацию горючего в смеси, выявляют максимальное значение давления взрыва. Основным элементом системы установки является на рисунке 2.4 [1].

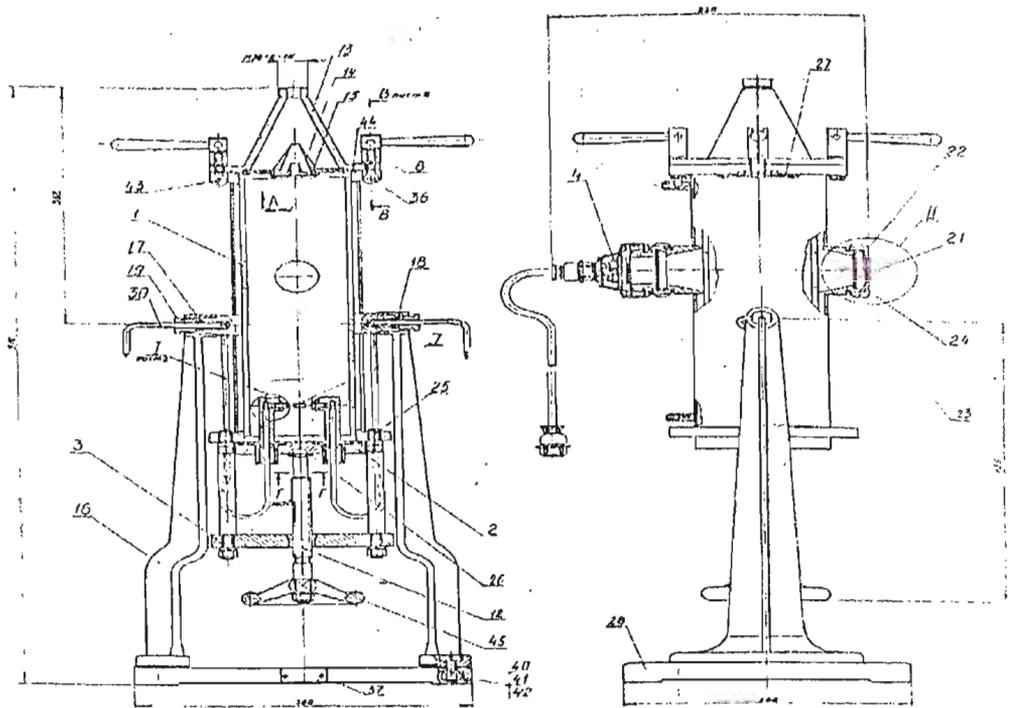


Рисунок 2.4 – Реакционный сосуд

1–корпус; 2 –дно; 3 – траверса; 4 –датчик давления; 5 – переходник;  
 7 – воспламенитель; 13 – корпус; 14 – вставка; 15 – вставка; 16 – стойка; 17  
 – уплотнитель; 21 - стекло для наблюдения; 28 - рама; 30 – ограничитель

Реакционный сосуд, представляющий собой цилиндр высотой  $(450 \pm 25)$  мм и внутренним диаметром  $(105 \pm 5)$  мм, выполнен из нержавеющей стали и рассчитан на рабочее давление до 1 МПа. Сосуд снабжен штуцерами для подачи газовых компонентов и подсоединения датчика давления.

Система газоприготовления и распыления исследуемого вещества, рассчитанная на рабочее давление до 1 МПа, состоит из:

- конусного распылителя с углом раствора  $30^\circ \pm 5^\circ$ , который является верхней крышкой реакционного сосуда и выполнен из нержавеющей стали;
- форкамеры, в которую помещают образец исследуемого вещества;
- обратного клапана и клапана с электроприводом; время открытия электропневмоклапана  $(0,3 \pm 0,1)$  с;
- ресивера с трубопроводами вместимостью  $(1,0 \pm 0,2)$  дм<sup>3</sup>;
- манометра класса точности 0,25.

Источник зажигания, представляющий собой нагреваемую электрическим током до температуры  $(1050 \pm 50)$  °С спираль из проволоки марки Х20Н80-Н [6, 4]

диаметром 0,8 мм. Длина спирали  $(50 \pm 1)$  мм, внутренний диаметр спирали  $(8,0 \pm 0,5)$  мм; число витков 30; потребляемая мощность при токе  $(13,0 \pm 0,5)$  А составляет  $(475 \pm 25)$  Вт, время выхода на рабочую температуру  $(8 \pm 1)$  с. Спираль расположена горизонтально на оси цилиндра на расстоянии  $(150 \pm 5)$  мм от нижнего фланца.

Система регистрации давления, состоящая из датчика давления и вторичных приборов, должна обеспечивать непрерывную или дискретную запись изменения давления во времени в частотном диапазоне от 0 до 300 Гц с верхним пределом измерения не менее 1 МПа. За начало отсчета времени принимают момент срабатывания клапана распыления образца исследуемого вещества [4].

Пульт управления, обеспечивает электропитание и синхронизацию в заданной последовательности работы. Основные технические характеристики установки представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные технические характеристики установки

Наименование параметра	Значение параметра
Рабочее давление	до 1 МПа
Электрическое напряжение	220 В
Мощность источника зажигания при 30 А и 20 В	600 Вт
Температура нагрева	1050 °С
Время достижения температуры нагрева	25 с
Реакционный сосуд: диаметр	450 мм
высота	105 мм
толщина стенки	7 мм
угол раствора конусного распылителя	30°
Время открытия электроклапана	0,3 с

Основные расчётные зависимости при определении показателей пожаровзрывобезопасности веществ и материалов (применительно к определению показателей взрыва):

максимальное давление взрыва:

$$P_{min} = \frac{p_n T_{ад}(V) \sum m_{jk}}{T_u \sum m_{ju}}, \quad (2.5)$$

где  $p_n$  – начальное давление, при котором находится исходная смесь, кПа;

$T_{ад}(V)$  – адиабатическая температура горения стехиометрической смеси горючего с воздухом при постоянном объеме, К;

$\sum m_{jk}$  – сумма числа молей конечных продуктов горения;

$T_u$  – температура исходной смеси, К;

$\sum m_{ju}$  – сумма числа молей газообразных исходных веществ.

### 2.2.5 Метод определения концентрационных пределов

Для определения концентрационных пределов распространения пламени зажигают газо-, паро- или пылевоздушную смесь с заданной концентрацией исследуемого вещества в объеме реакционного сосуда и устанавливают факт наличия или отсутствия распространения пламени. Изменяя концентрацию горючего в смеси, находят её минимальное и максимальное значение, при которых происходит распространения пламени (см. рисунок 1.3) [14,4].

Длительное время пределы распространения пламени газов измеряли в установке КП, реакционной камерой в которой служила вертикальная стеклянная трубка диаметром 50 – 55 мм и высотой 1500 мм. Нижняя часть трубки закрывается пришлифованной стеклянной пластинкой. В реакционный сосуд на расстоянии 100 мм от его нижнего конца введены на шлифах электроды с наконечниками, изготовленными из молибденовой проволоки. Разрядный промежуток между электродами составляет 8 мм.

Предварительно рассчитывают нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени по газо-, паровоздушным смесям исследуемого вещества по формуле, %

$$\varphi_L = \frac{100}{a_m \beta + b_m}, \quad (2.6)$$

$$\beta = m_c + m_s + \frac{m_n - m_x}{4} - \frac{m_o}{2} + 2,5m_p, \quad (2.7)$$

$m_c, m_s, m_n, m_x, m_p, m_o$  – число атомов углерода, серы, водорода, галогена, фосфора и кислорода в молекуле соединения;  $a_m$  и  $b_m$  – универсальные константы, значения которых приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Значения постоянных  $a_m$  и  $b_m$  в формуле 2.6

Предел распространения пламени	$a_m$	$b_m$
Нижний	8,684	4,679
Верхний при $\beta \leq 7,5$	1,550	0,560
при $b > 7,5$	0,768	6,554

В разделе изучены объект исследования сахар-песок согласно ГОСТ 21-94 и методы определения: НКПР, максимальное давление взрыва, удельная поверхность, фракционный состав, определение максимального давления взрыва измельчённого сахара.

### 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ ВЗРЫВА ИЗМЕЛЬЧЁННОГО САХАРА

#### 3.1 Размол материала и проведение ситового анализа измельчённого сахара

Размол материала и проведение ситового анализа измельчённого сахара проводили на лабораторной шаровой мельнице. Сахар измельчали в течение 5, 15 и 30 минут. Полученный материал рассеивали на ситах с максимальным размером ячеек от 0,14 мм до 0,05 мм. Результаты подготовки проб рассеянного материала представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Фракционный состав в зависимости от времени измельчения

Время измельчения, мин	Фракция, мм / содержание, г					
	0,14	0,1	0,08	0,05	менее 0,05	Потери, %
5	61,99	7,95	7,21	8,64	7,35	2,98
15	40,54	10,59	9,05	10,95	8,41	2,18
30	42,77	13,85	22,56	15,59	9,83	3,77

На рисунке 3.1 представлена зависимость сахара от времени измельчения. Установлено, что время измельчения пробы сахара значительно влияет степень измельчения – уменьшается количество крупных фракций, а мелких растёт.

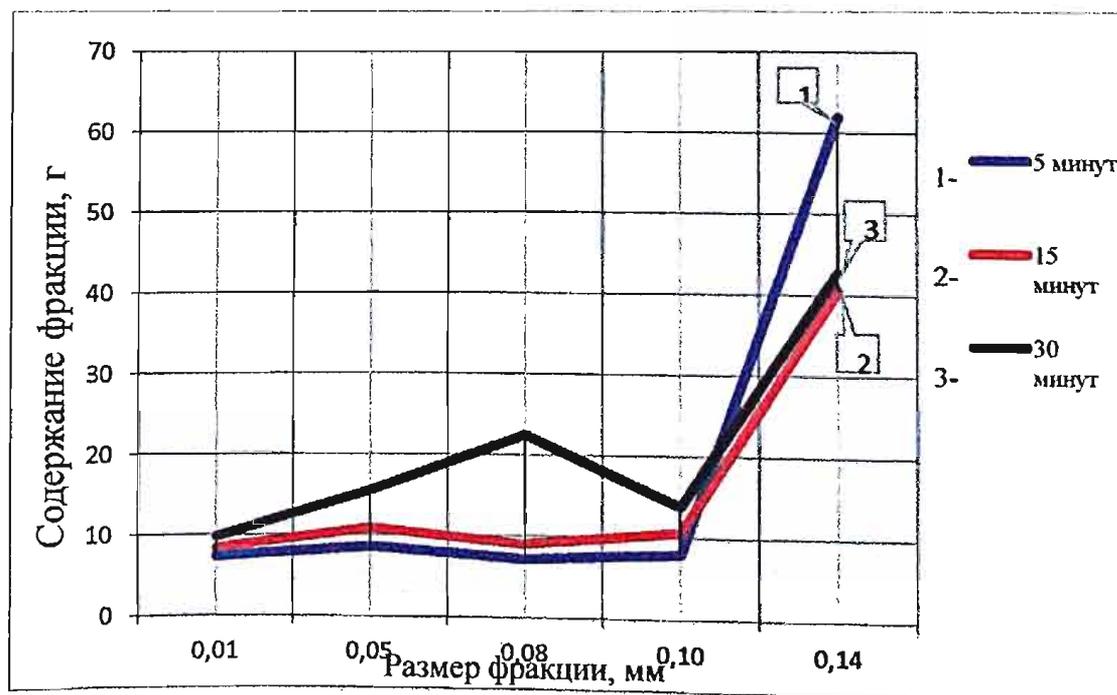


Рисунок 3.1 – Зависимость содержания фракции от размера и времени измельчения

### 3.2 Определение удельной поверхности материала

С помощью прибора ПСХ-10А определили удельную поверхность измельчённого сахара в зависимости от времени измельчения.

Показатель удельной поверхности проб материала в зависимости от времени измельчения представлены в таблице 3.2 и на рисунке 3.2.

Таблица 3.2 – Фракционный состав и удельная поверхность проб сахара в зависимости от времени измельчения

Время измельчения, мин	S уд, см <sup>2</sup> /г	Фракция, мм / содержание, г				
		0,14	0,1	0,08	0,05	менее 0,05
5	203	61,99	7,95	7,21	8,64	7,35
15	842	40,54	10,59	9,05	10,95	8,41
30	1004	42,77	13,85	22,56	15,59	9,83



Рисунок 3.2 – Зависимость удельной поверхности материала от времени измельчения

### 3.3 Определение максимального давления взрыва измельчённого сахара

Для определения максимального давления взрыва измельченного сахара использовали установку по ГОСТ Р 12.3.047-2012, применяемую для оценки взрывопожароопасных свойств пылевых материалов.

Для проведения эксперимента готовили навески измельченного материала (непросеянного) при времени измельчения 5, 15 и 30 минут весом 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 и 4 грамма. Каждую подготовленную навеску помещали в форкамеру. При нагреве источника зажигания навеска под давлением распыляется в реакционном сосуде, и снимаются показатели максимального избыточного давления взрыва на регистрирующий прибор. Экспериментальные данные определения НКПР и зависимости давления взрыва от времени измельчения представлены в таблице 3.3; 3.4 и на рисунке 3.3.

Таблица 3.3 – НКПР измельченного сахара

Время измельчения, t, мин	НКПР, г/м <sup>3</sup>
5	25
15	19
30	25

Таблица 3.4 – Зависимость максимального давления взрыва от навески материала и времени измельчения

Время измельчения, t, мин	Вес, г						
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4
	Максимальное давление взрыва, кПа						
5	97	106	106	136	192	198	513
15	110	112	150	193	358	461	487
30	113	113	126	197	487	536	548

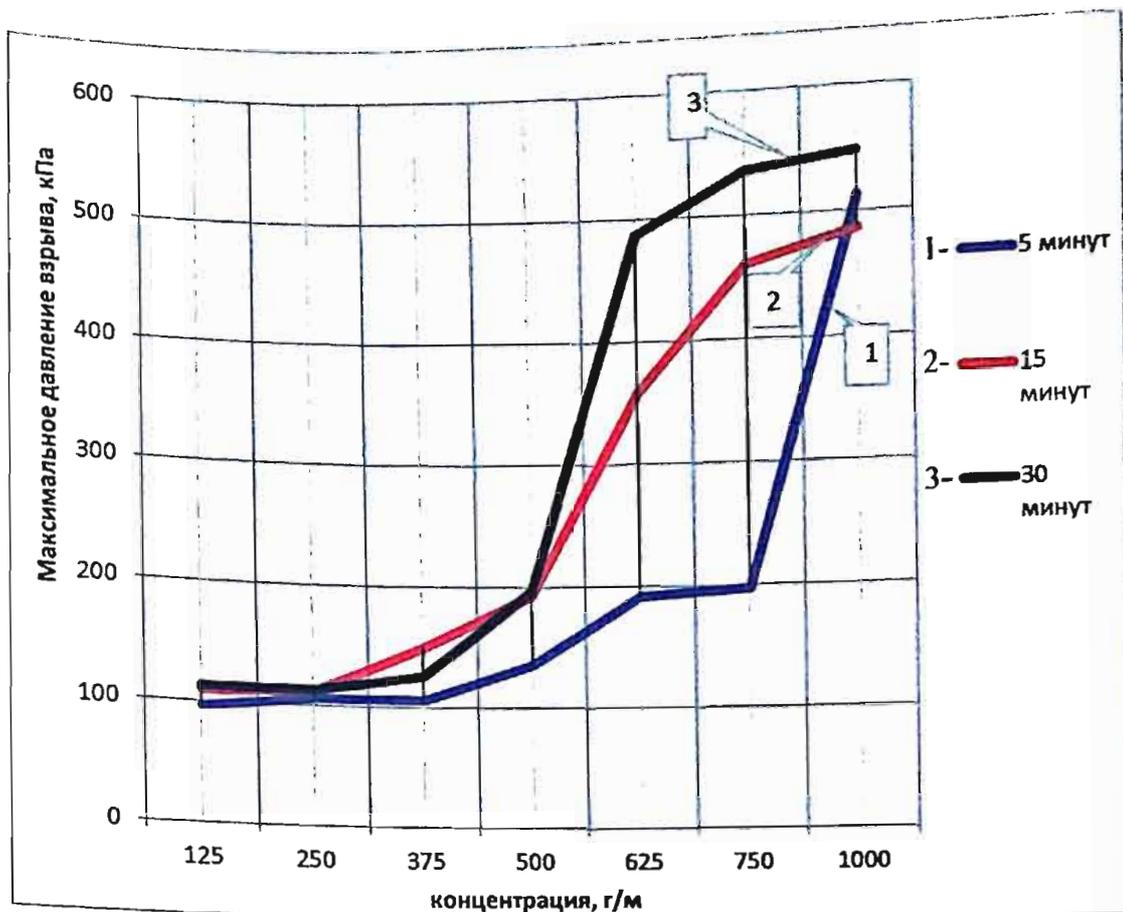


Рисунок 3.3 – Зависимость максимального давления взрыва от времени измельчения и концентрации сахарной пыли

Для определения влияния фракционного состава на максимальное давление взрыва готовили навески измельченного материала весом 1, 2, 3 и 4 грамма. Каждую подготовленную навеску помещали в форкамеру. При нагреве источника зажигания навеску под давлением распыляли в реакционном сосуде, и снимали показатели давления взрыва на регистрирующем приборе. Экспериментальные данные зависимости давления взрыва от фракционного состава представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Максимальное давление взрыва в зависимости от фракционного состава сахара

Время измельчения, мин	Вес, г	Размер фракции, мм			
		0,14	0,08	0,05	менее 0,05
Максимальное давление взрыва, кПа					
5	1	319	124	122	153
	2	212	598	620	598
	3	377	597	603	579
	4	369	583	634	593
15	1	128	222	142	125
	2	241	389	530	548
	3	240	625	634	607
	4	372	634	634	581
30	1	126	162	151	280
	2	134	548	540	527
	3	271	634	634	588
	4	362	634	603	623

На рисунках 3.4 – 3.7 представлена зависимость максимального давления взрыва от размера фракции и времени измельчения.

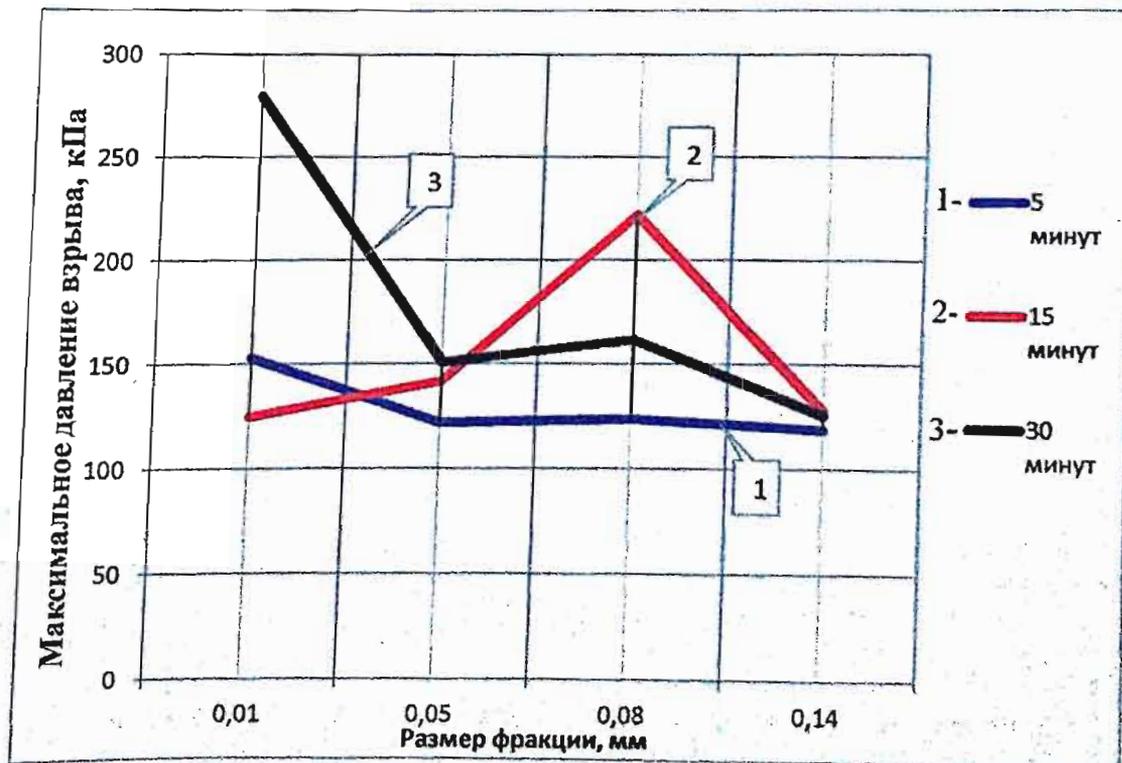


Рисунок 3.4 – Зависимость максимального давления взрыва от фракционного состава и времени измельчения сахара (концентрация 250 г/м<sup>3</sup>)

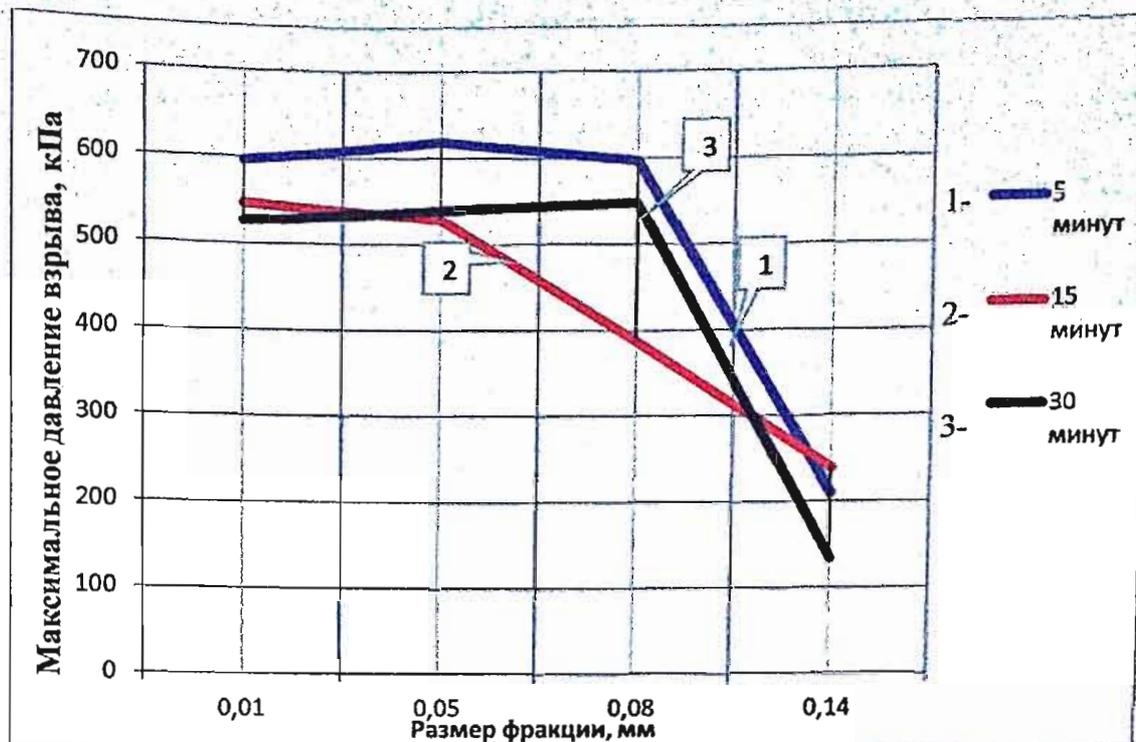


Рисунок 3.5 – Зависимость максимального давления взрыва от фракционного состава и времени измельчения сахара (концентрация 500 г/м<sup>3</sup>)

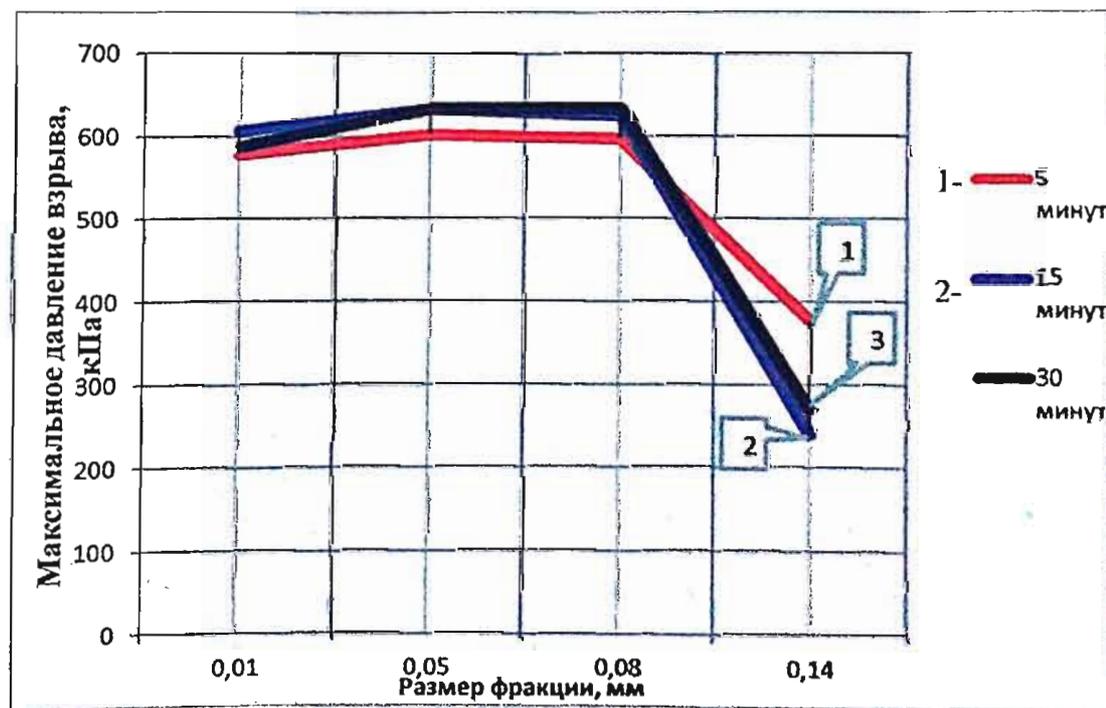


Рисунок 3.6 – Зависимость максимального давления взрыва от фракционного состава и времени измельчения сахара (концентрация 750 г/м<sup>3</sup>)

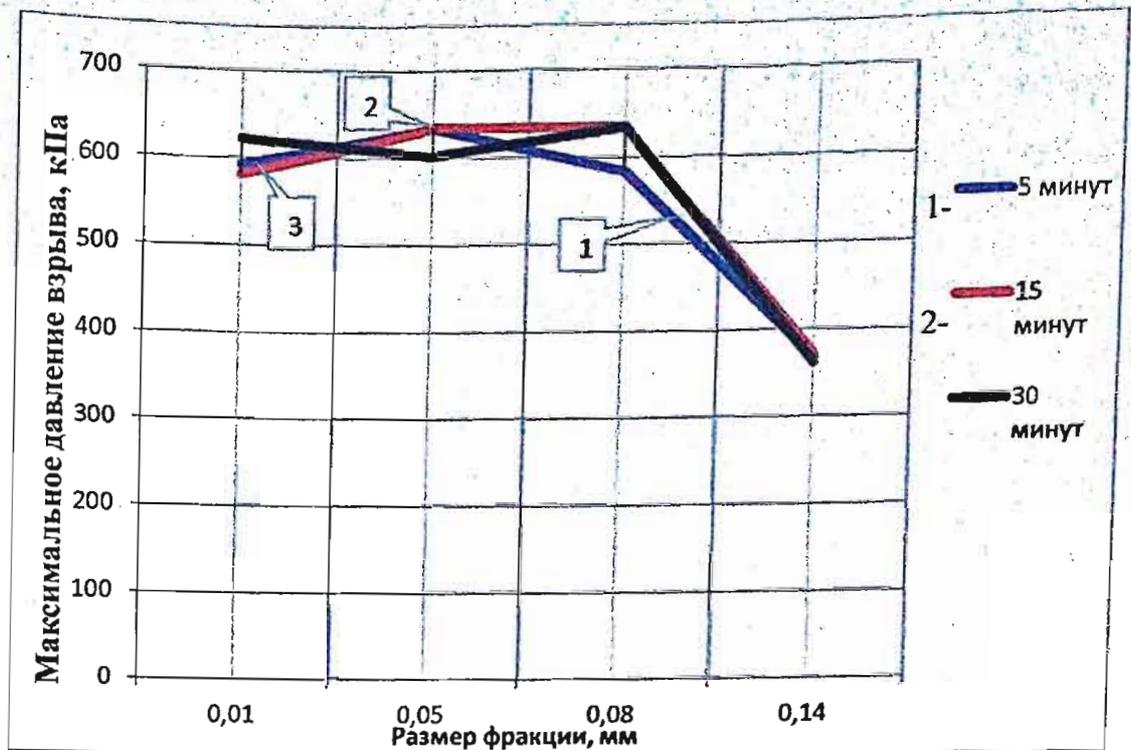


Рисунок 3.7 – Зависимость максимального давления взрыва от фракционного состава и времени измельчения сахара (концентрация 1000 г/м<sup>3</sup>)

В разделе проведен размол и ситовой анализ измельчённого сахара. Определена удельная поверхность материала. Определены НКПР и зависимость максимального давления взрыва от фракционного состава и времени измельчения.

#### 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании проведённых исследований установлено, что с увеличением времени измельчения содержание фракции в диапазоне от 0,1 до  $< 0,05$  мм увеличивается. Содержание крупной фракции 0,14 мм – уменьшается (см. таблицу 3.1).

При определении  $S$  уд,  $\text{см}^2/\text{г}$ , выявлено (рисунок 3.2) с увеличением времени измельчения с 5–30 минут,  $S$  уд,  $\text{см}^2/\text{г}$  увеличивается в 5 раз.

Определён НКПР не рассеянного сахар-песка. В зависимости от времени измельчения (от 5 до 15 минут) НКПР измельченного сахара вначале уменьшается, а затем (30 минут размол) увеличивается и достигает значения НКПР, соответствующее времени измельчения – 5 минут. Рост НКПР может быть обусловлен коагуляцией частиц пыли сахара, вследствие длительного размол.

Минимальное давление взрыва измельчённого материала соответствует навеске материала в 0,5 г, величина которого составляет 97-113 кПа в зависимости от времени измельчения (см. рисунок 3.3). Максимальное давление взрыва наблюдается для пробы, (измельчённой в течение 5 минут), весом в 4 г (концентрация  $1000 \text{ г}/\text{м}^3$ ), измельчённой в течение 15–30 минут весом в 3 г (концентрация  $750 \text{ г}/\text{м}^3$ ). Следует отметить, что максимальное давление взрыва для проб, измельчённых при 30 минутах выше, чем при 5 и 15 минутах.

При изучении влияния дисперсности измельчённого сахара и концентрации на давление взрыва ( $\Delta P$ ) установлено из таблицы 3.4 видно, что с уменьшением размера фракции давление взрыва увеличивается и достигает максимального значения при измельчении сахара до 0,08 мм и концентрации  $750 \text{ г}/\text{м}^3$  (вес пробы 3 г) для проб, измельчённых при 15–30 минутах, а для пробы помолом 15 минут – при измельчении до 0,05 мм и концентрации  $1000 \text{ г}/\text{м}^3$  (вес 4 г).

На рисунках 3.4 – 3.7 видно, что время измельчения пробы сахара незначительно влияет на максимальное давление взрыва для крупных фракций – 0,14 мм. Максимальным давлением взрыва характеризуется материал,

измельченный до 0,08 мм и 0,05 мм, величина давления взрыва которого, приблизительно в два раза больше в сравнении с фракцией 0,14 мм. Для фракции менее 0,05 максимальное давление взрыва снижается. Таким образом, менее опасным являются пыли, измельченные 5 минут фракцией до 0,05 мм и концентрацией 500 г/м<sup>3</sup>, более опасными – пыли, измельченные 15–30 минут фракцией 0,08 мм и концентрацией от 750 г/м<sup>3</sup>.

Таким образом на максимальное давление взрыва влияет степень измельчения (дисперсность), время измельчения и концентрация сахарной пыли. Чем меньше продолжительность измельчения, тем менее взрывоопасна пыль сахара.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучены взрывопожароопасные свойства пылей, производство и переработка сахара, экспериментальные методы по определению максимального давления взрыва и скорости нарастания давления, нижний концентрационный предел распространения пламени НКПР в пылевоздушных смесях.

В качестве объекта исследования использовали сахар-песок согласно ГОСТ 21-94. Для изучения взрывопожароопасных свойств использовали методы определения НКПР, максимального давления взрыва, удельной поверхности.

Из таблицы 3.1 видно, что с увеличением времени измельчения содержание фракции в диапазоне от 0,1 до < 0,05 мм увеличивается. Содержание крупной фракции 0,14 мм – уменьшается.

Установлено, что время измельчения пробы сахара значительно влияет степень измельчения уменьшается количество крупных фракций, а мелких растёт. На рисунке 3.2 видно, что при времени измельчения с 5–30 минут,  $S$  уд,  $\text{см}^2/\text{г}$  увеличивается в 5 раз.

В зависимости от времени измельчения (от 5 до 15 минут) НКПР измельченного сахара вначале уменьшается, а затем (30 минут размола) увеличивается и достигает значения НКПР, соответствующее времени измельчения – 5 минут. Рост НКПР может быть обусловлен коагуляцией частиц пыли сахара, вследствие длительного размола.

Минимальное давление взрыва измельчённого материала соответствует навеске материала в 0,5 г, величина которого составляет 97-113 кПа в зависимости от времени измельчения (см. рисунок 3.3). Максимальное давление взрыва наблюдается для пробы, (измельчённой в течение 5 минут), весом в 4 г (концентрация  $1000 \text{ г}/\text{м}^3$ ), измельчённой в течение 15–30 минут весом в 3 г (концентрация  $750 \text{ г}/\text{м}^3$ ). Следует отметить, что максимальное давление взрыва для проб, измельчённых при 30 минутах выше, чем при 5 и 15 минутах. Следовательно, чем меньше продолжительность измельчения, тем менее взрывоопасна пыль сахара.

Из таблицы 3.5 видно, что на максимальное давление взрыва влияет дисперсность измельчённого сахара. С уменьшением размера фракции давление взрыва увеличивается и достигает максимального значения при измельчении сахара до 0,08 мм и концентрации 750 г/м<sup>3</sup> (вес пробы 3 г) для проб, измельчённых при 15–30 минутах, а для пробы помолом 15 минут – при измельчении до 0,05 мм и концентрации 1000 г/м<sup>3</sup> (вес 4 г).

На рисунках 3.4 – 3.7 представлена зависимость максимального давления взрыва от размера фракции и времени измельчения. Установлено, что время измельчения пробы сахара незначительно влияет на максимальное давление взрыва для крупных фракций – 0,14 мм. Максимальным давлением взрыва характеризуется материал, измельченный до 0,08 мм и 0,05 мм, величина давления взрыва которого, приблизительно в два раза больше в сравнении с фракцией 0,14 мм. Для фракции менее 0,05 максимальное давление взрыва снижается. Таким образом, менее опасным являются пыли, измельчённые 5 минут фракцией до 0,05 мм и концентрацией 500 г/м<sup>3</sup>, более опасными – пыли, измельченные 15–30 минут фракцией 0,08 мм и концентрацией от 750 г/м<sup>3</sup>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баратов, А. Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочное издание: в 2-х книгах / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук [и др]. – М.: Химия, 1990. – Книга 1 – 496 с., – Книга 2 – 384 с.
2. Бобков, С.А. Физико-Химические основы развития и тушения пожаров: Учебное пособие / С.А. Бобков, А.В. Бабурина, П.В. Комраков М.: – Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
3. Годжелло, М.Г. Взрывы промышленных пылей и их предупреждение / М.Г. Годжелло – М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1952. – 143 с.
4. ГОСТ Р 12.3.047-2012 . Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Метод контроля. – М.:ФГБУ ВНИИПО МЧС России , 2012. – 61 с.
5. ГОСТ Р 12.3.047-98. Пожарная безопасность технологических процессов. – М.: Постановление Госстандарта России от 3 августа 1998 г. № 304, 2000. – 131 с.
6. ГОСТ 21-94. Сахар-песок. Технические условия. – М.: Постановление Госстандарта России от 13 декабря 1995 г. № 599, 1997. – 16 с.
7. ГОСТ 12579-2013. Сахар метод определения гранулометрического состава. – Стандартинформ.: Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 03.12.2013 г. № 62-П, 2014. – 12 с.
8. Корольченко, А. Я. Пожаровзрывоопасность промышленной пыли / А.Я. Корольченко – Москва: Химия, 1986. – 216 с.
9. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справочник: в 2-х ч., 2-е изд., перераб. и доп ./А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко, – М.: «Пожнаука», 2004. – Ч.1. – 713 с.

10. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2-х ч., 2-е изд., перераб. и доп. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко – М.: «Пожнаука», 2004. – Ч.2. – 774 с.
11. Капуцкий, Н. Ф. Пособие по химии для поступающих в вузы / Ф. Н. Капуцкий, В. Ф.Тикавый – Минск: Высш. школа, 1979. – 384 с.
12. Кнунянц, Л. И. Химическая энциклопедия / И. Л. Кнунянц. – М.: «Советская энциклопедия», 1988. – Т. 1. – С. 217–218.
13. Кольцов, К.С. Самовозгорание твердых веществ и материалов и его профилактика / К.С. Кольцов, Б.Г. Попов – М.: Химия, 1978. – 160 с.
14. Коузов, П.А. Методы определения Физико-Химических свойств промышленных пылей / П.А. Коузов, Л.Я. Скрыбина – М.: Химия, 1983. – 145 с.
15. Процессы горения и взрыва // <http://5fan.ru/wievjob.php?id=5975/#3>.
16. Семенов, Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов. Теория горения и взрыва / Н.Н. Семенов – М.: Наука, 1981. – с.33 – 140.
17. Сечин, А.И. Безопасность систем перерабатывающих пылеобразующие материалы / Под ред. д.ф.-м.н. Н.И. Федосова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2003, – 143с.
18. Ходаков, Г.С. Физика измельчения – Г.С. Ходаков – М.: Наука, 1972. – 307 с.
19. Чернышев, А.К. Стрижевский И.И / Журн. Всес. хим. общества им. Д.И. Менделеева. – 1985. – Т.30. – № 1. – С. 74–81.
20. Минаев, Д.С. Пожаро- и взрывоопасные свойства аэрозолей наноразмерных материалов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.26.03-05 – Минаев Дмитрий Сергеевич. – Москва, 2011. – 19 с.
21. Сечин, А.И. Влияние температуры нагрева источника зажигания на величину нижнего концентрационного предела распространения пламени в аэровзвесах / А.И. Сечин, В.Я. Яшин // Ученые зап. / Томский политехн-ий ун-т. – 2003. – Т.306 № 6. – 5 с.