

Лабораторная работа

Исследование зависимости давления взрыва и скорости его нарастания в газо-воздушной смеси от концентрации горючего

Цель работы. Расчетным и экспериментальными методами изучить влияние состава горючей газо-воздушной смеси на давление взрыва и скорости его нарастания.

Содержание работы.

1. Расчетным методом определить температуру и давление взрыва газо-воздушной смеси при различных заданных концентрациях горючего.
2. Экспериментально определить давление взрыва газо-воздушной смеси и скорость нарастания давления взрыва в замкнутом объеме в диапазоне заданных концентраций горючего.
3. По расчетным и экспериментальным результатам построить графики зависимостей давления взрыва и скорости его нарастания от состава смеси.
4. По полученным данным сделать выводы.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

При сгорании газо-воздушной смеси в замкнутом объеме происходит повышение давления. Когда давление достигает предела прочности, наступает разрушение элементов конструкций зданий, сооружений, аппаратов.

Давление взрыва является важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании легко сбрасываемых конструкций, предотвращающих полное разрушение зданий, прочностном расчете аппаратов, разрушающихся предохранительных мембран, клапанов и т.д.

Скорость нарастания давления взрыва пропорциональна скорости кинетического горения газо-воздушной смеси, которая может составлять от нескольких сантиметров в секунду в ламинарном режиме горения до сотен метров в секунду при турбулентном режиме.

Рост давления происходит в результате повышения температуры от начальной до температуры взрыва и увеличения числа молей в ходе химического превращения.

$$P_{\text{взр}} = P_0 \cdot \frac{T_{\text{взр}} \cdot n_{\text{пр}}}{T_0 \cdot n_{\text{гс}}} \quad (4.1)$$

где P_0 – начальное давление газо-воздушной смеси, кПа; T_0 и $T_{\text{взр}}$ – начальная температура газо-воздушной смеси и температура взрыва, К; $n_{\text{пр}}$ и $n_{\text{гс}}$ – количества молей продуктов горения и горючей смеси, моль/моль.

Для взрывов стехиометрических и бедных смесей формула для расчёта давления взрыва примет вид

$$P_{\text{взр}} = P_0 \cdot \frac{T_{\text{взр}} \cdot n_{\text{пг}}(n_{\text{пг}}^0 + \Delta n_{\text{в}})}{T_0 \cdot (n_{\text{пг}} + \alpha \cdot n_{\text{в}}^0)} \quad (4.2)$$

где $n_{\text{пг}}^0$ и $n_{\text{в}}^0$ – теоретические количества молей продуктов горения и воздуха, моль/моль; α – коэффициент избытка воздуха; $\Delta n_{\text{в}}$ – избыток воздуха моль/моль,

$$\Delta n_{\text{в}} = n_{\text{в}}^0(\alpha - 1) \quad (4.3)$$

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Заполняется таблица исходных данных

Таблица 1

Исходные данные		
№ п/п	Параметр	Значение параметра
1.	Горючий газ	
2.	Концентрация газа в воздухе $1,3\varphi_{\text{н}}$, $1,6\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{стех}}$, $0,73\varphi_{\text{в}}$, $0,87\varphi_{\text{в}}$, % об.	
3.	Начальная температура, °С	
4.	Атмосферное давление, кПа	

Концентрации горючего газа в газо-воздушной рассчитывают по значениям НКПР ($\varphi_{\text{н}}$), ВКПР ($\varphi_{\text{в}}$) и стехиометрической концентрации ($\varphi_{\text{стех}}$). Значения НКПР и ВКПР берут из справочной литературы или рассчитывают по аппроксимационной формуле. Стехиометрическую концентрацию горючего находят из уравнения материального баланса. Температура и атмосферное давление определяются по соответствующим приборам в лаборатории.

2.2. Расчетная часть

Расчёт давления взрыва проводят только для бедных и стехиометрических смесей ($1,3\varphi_{\text{н}}$, $1,6\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{стех}}$).

1. Расчет количества молей воздуха, продуктов горения и коэффициента избытка воздуха.

Теоретические количества молей воздуха ($n_{\text{в}}^0$) и продуктов горения ($n_{\text{пг}}^0$) находят из уравнения материального баланса процесса горения

$$n_{\text{в}}^0 = n_{\text{O}_2}^0 + n_{\text{N}_2}^0, \quad (4.4)$$

а ($n_{\text{пг}}^0$) при горении углеводородов

$$n_{\text{пг}}^0 = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2}^0. \quad (4.5)$$

Коэффициент избытка воздуха при известной концентрации горючего ($\varphi_{\text{г}}$) определяют по уравнению

$$\alpha = \frac{100 - \varphi_{\text{г}}}{\varphi \cdot n_{\text{в}}^0}, \quad (4.6)$$

Избыток воздуха находят по уравнению (4.3).

Для смеси стехиометрического состава $\alpha = 1$, поэтому объём горючей смеси будет равен

$$n_{гс} = n_{г} + n_{в}^0, \quad (4.7)$$

а объём продуктов горения

$$n_{пг} = n_{пг}^0, \quad (4.8)$$

Для бедных смесей, т.е. смесей, содержащих избыток воздуха, объём горючей смеси и объём продуктов горения будет больше на величину избытка воздуха

$$n_{гс} = n_{г} + n_{в}^0 + \Delta n_{в} = n_{г} + \alpha \cdot n_{в}^0 \quad (4.9)$$

$$\text{и } n_{пг} = n_{пг}^0 + \Delta n_{в}. \quad (4.10)$$

Расчётные величины, полученные для бедных и стехиометрической смесей, заносят в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	Концентрация горючего в воздухе, $\varphi_{г}$, % об.	Коэффициент избытка воздуха, α	Избыток воздуха, $\Delta n_{в}$, моль/моль	Количество молей горючей смеси, $n_{гс}$, моль/моль	Количество молей продуктов горения, $n_{пг}$, моль/моль
1.					
2.					
3.					

2. Расчет адиабатической температуры и давления взрыва. Температуру взрыва газо-воздушной смеси рассчитывают из уравнения теплового баланса методом последовательных приближений.

Количество выделившейся при взрыве теплоты ($Q_{взр}$), равную низшей теплоте сгорания $Q_{н}$, находят по закону Гесса

$$Q_{взр} = (\sum n_i \cdot \Delta H_i)_{\text{прод}} - (\sum n_j \cdot \Delta H_j)_{\text{исх}},$$

где n_i и n_j - число молей i -продукта и j -исходного вещества в уравнении химической реакции горения; ΔH_i и ΔH_j - теплоты образования соответствующих веществ.

Значения теплоты образования некоторых веществ приведены в таблице 1 приложения.

Расчёт температуры взрыва начинают с нахождения среднего значения внутренней энергии, которую будут иметь продукты, образовавшиеся в результате взрыва.

$$U_{ср} = \frac{Q_{взр}}{n_{пг}}. \quad (4.11)$$

Затем по зависимости внутренней энергии от температуры (см. таблицу 4 приложения) подбирают температуру, при которой полная внутренняя энергия продуктов горения будет равна теплоте взрыва ($Q_{\text{взр}}$). Метод подробно описан в методическом пособии «Андросов А.С., Салеев Е.П. Примеры и задачи по курсу «Теория горения и взрыва». Учеб. Пособие. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2008. – 80 с».

Температуру взрыва определяют для трёх выбранных концентраций горючего. Для этих же концентраций горючего находят и давление взрыва по формуле (4.2). Результаты расчётов заносят в таблицу 3.

Таблица 3

Расчётные значения температуры и давления взрыва

№ п/п	Концентрация горючего в воздухе, φ_r , % об.	Температура взрыва, $T_{\text{взр}}$, К	Давление взрыва, $P_{\text{взр}}$, кПа
1.			
2.			
3.			

2.3. Экспериментальная часть

В экспериментальной части работы определяют давление взрыва и скорость его нарастания в бедных, стехиометрической и богатых газоздушных смесях.

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из взрывного сосуда – бомбы постоянного объема 1, снабженной электродами 2 для искрового зажигания горючей смеси через высоковольтный генератор 3, подключаемый к электрической сети.

В корпус бомбы вмонтирован датчик давления 4, который через аналоговый цифровой преобразователь 5 соединен с компьютером 6, на котором с помощью программного обеспечения показания датчика преобразуется в графическую зависимость изменения давления в сосуде во времени – $P=f(\tau)$.

Сосуд через краны 7 и 8 соединен с атмосферой и манометром 13, через кран 9 и трехходовой кран 10 с вакуумметром 11 и вакуумным насосом 12. Концентрация горючего газа (φ_r) во взрывном сосуде равна

$$\varphi_r = \frac{P_r}{P_0} \cdot 100, \quad (4.12)$$

где P_r – парциальное давление газа в сосуде, кПа; P_0 – атмосферное давление, кПа.

Из (12) по заданному значению концентрации (табл.1) определяется требуемое парциальное давление горючего газа

$$P_{\Gamma} = \frac{\varphi_{\Gamma} \cdot P_0}{100}. \quad (4.13)$$

Набор горючего газа осуществляют по показаниям вакуумметра. Количество делений вакуумметра, соответствующее парциальному давлению горючего газа, находят из соотношения

$$Z_{\Gamma} = Z_{\Sigma} \cdot \frac{P_{\Gamma}}{P_0}, \quad (4.14)$$

где Z_{Σ} – полное число делений на шкале вакуумметра.

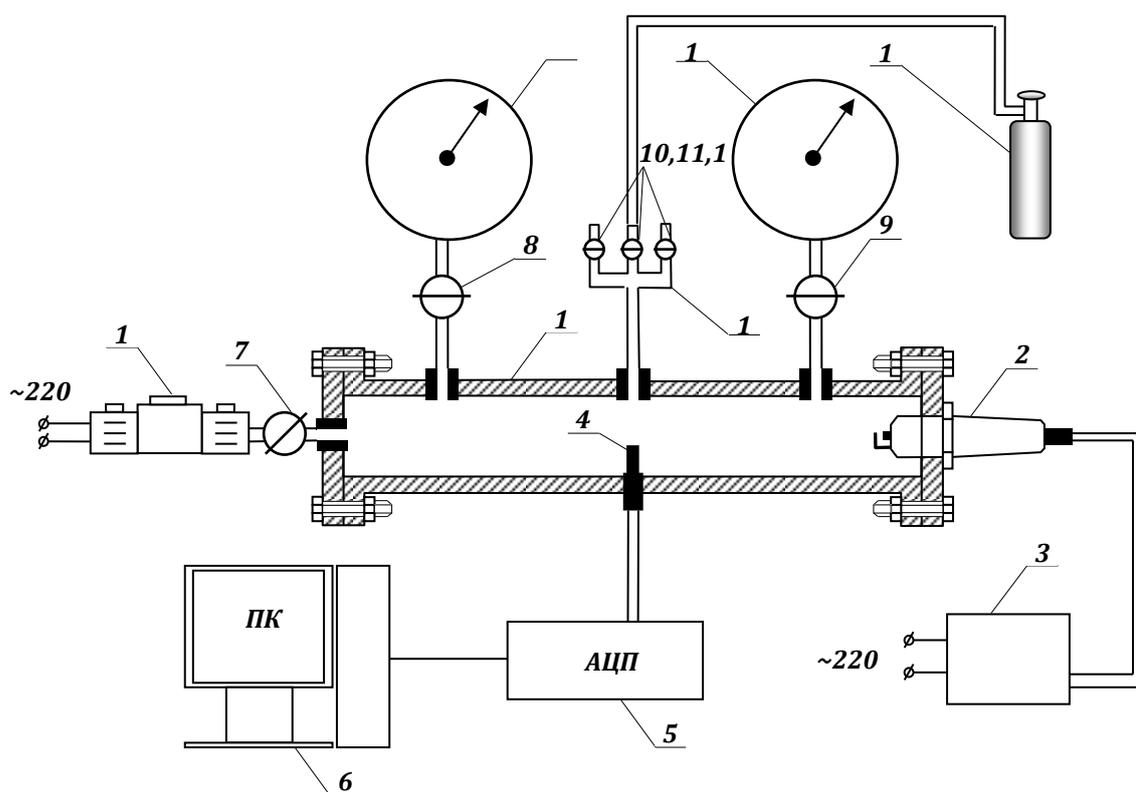


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – взрывной сосуд; 2 – электроды зажигания; 3 – генератор; 4 – датчик давления; 5 – аналогово-цифровой преобразователь; 6 – компьютер; 7, 8, 9, 10, 11 и 12 – краны; 13 – вакуумный насос; 14 – вакуумметр; 15 – манометр, 16 – гребёнка, 17 – баллон с исследуемым горючим газом

Опыт проводится в следующем порядке.

1. В положении *A* трехходового крана 10, закрытом кране 8 и открытом кране 9 проводится четырехкратное вакуумирование сосуда 1 с периодическим открыванием и закрыванием крана 7, тем самым сосуд освобождается от продуктов взрыва предыдущего опыта.

2. При закрытых кранах 7 в сосуде создается разрежение и кран 10 переводится в положение *B* – соединяется с вакуумметром, показания которого отмечаются.

3. К крану 7 подключается баллон с горючим газом и при его медленном открывании в сосуд запускается по показанию вакуумметра требуемое количество газа.

4. Перекрываются краны 7 и 9, баллон с газом отсоединяется от крана 7 и затем кран 7 открывается на атмосферу для набора в сосуд воздуха.

5. Закрывается кран 7, а образовавшаяся газо-воздушная смесь выдерживается в течение 10 минут для более равномерного распределения горючего газа по объёму сосуда в результате диффузии.

6. Включается кнопка искрового разрядника 3, газо-воздушная смесь воспламеняется. Изменение давления в сосуде фиксируется на мониторе компьютера 6. Примерный вид этой зависимости представлен на рис. 2.

За давление взрыва принимают максимальное значение давления, которое фиксирует датчик.

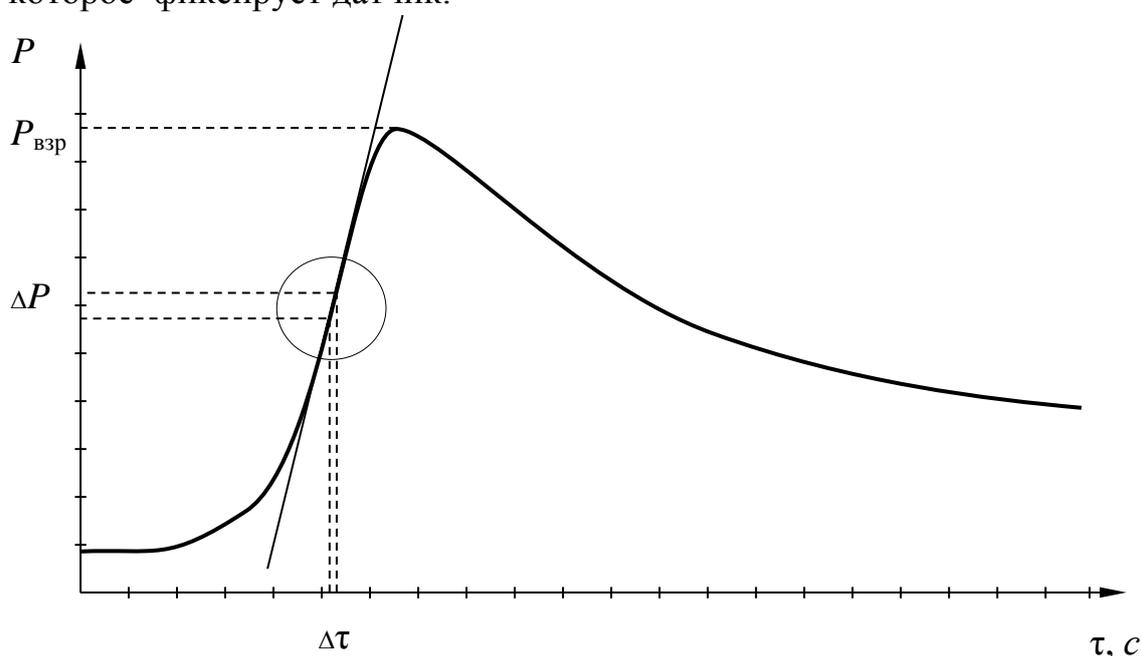


Рис. 2 Изменение давления в сосуде при сгорании газо-воздушной смеси

Для нахождения скорости нарастания давления взрыва $\frac{dP}{d\tau}$ выбирают участок на кривой $P=f(\tau)$, где рост давления наибольший, т.е. где кривая наиболее крутая. На этом участке выбирают два ближайших значения P_1 и P_2 соответствующие моментам времени τ_1 и τ_2 и находят скорость нарастания давления взрыва как отношение $\frac{\Delta P}{\Delta \tau}$. Результаты экспериментального измерения величин давления взрыва и скорости его нарастания в смеси данной концентрации заносят в таблицу 4.

**Результаты экспериментального исследования давления взрыва
и скорости его нарастания**

№ п/п	Концентрация горючего в сосуде, % об.	Давление горючего газа в сосуде, кПа	Число делений вакуумметра, $Z_{г}$, дел.	Давление взрыва, $P_{взр}$, кПа	Скорость нарастания давления взрыва dp/dt , кПа/с
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					

7. Приступают к следующему опыту с другой концентрацией горючего в последовательности пп. 1-6.

По данным таблиц 2 и 4 строятся графики зависимости давления взрыва от концентрации горючего в газо-воздушной смеси (расчётная и экспериментальная кривые) и зависимости скорости нарастания давления взрыва от концентрации горючего.

На основании анализа полученных результатов, сравнения расчётных и экспериментальных значений необходимо сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется взрывом?
2. За счёт каких факторов при сгорании газо-воздушной смеси в замкнутом объеме возрастает давление?
3. Рассчитайте давление в сосуде после взрыва горючего газа A стехиометрической концентрации в смеси с воздухом и охлаждении продуктов взрыва до начальной температуры.
4. Как изменится давление взрыва при добавлении в горючую смесь инертного газа?
5. Как изменится давление взрыва при замене воздуха на кислород?
6. При какой концентрации горючего A давление взрыва будет максимально:
 - в воздухе?
 - в кислороде?
7. Почему экспериментальные значения величины давления взрыва меньше расчётных?
8. В каком сосуде при экспериментальном определении давления взрыва его значение будет больше? В сферическом при зажигании в центре или цилиндрическом при зажигании в торце цилиндра? Почему?
9. О чём можно судить по величине скорости нарастания давления взрыва?
10. Какой сосуд используют при определении давления взрыва и скорости его нарастания по ГОСТ 12.1.004-89?