



**КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**



Тема № 9.6 «Расчет критического диаметра гашения пламени в сухих огнепреградителях»



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



Учебные вопросы:

1. Метод расчёта критического диаметра гашения пламени в сухих огнепреградителях
2. Определение критического диаметра гашения пламени в сухих огнепреградителях по методике Киселёва Я.С.



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



Основная:

1. Хорошилов О.А., Пелех М.Т., Бушнев Г.В., Иванов А.В. Пожарная безопасность технологических процессов: Учебное пособие/под общей редакцией В.С. Артамонова–СПб: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2012.–300 с.

Дополнительная:

1.Малинин В.Р., Хорошилов О.А. Огнепреграждающие устройства для защиты технологического оборудования и коммуникаций от распространения пожара: Учебное-методическое пособие. — СПб.: Санкт-Петербургская высшая пожарно-техническая школа МВД РФ, 1997. — 103 с.

2.Киселёв Я.С. Физические модели горения в системе предупреждения пожаров. Монография.-СПб.: СПбУ МВД России, 2000г, 264с.

Нормативные документы:

1.Руководство по расчету основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов – М.: ВНИИПО, 2002.-77с.

2. ГОСТ Р 53323-2009. Огнепреградители и искрогасители. Общие технические требования. Методы испытаний.



**КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**



Вопрос №1

**Метод расчёта
критического диаметра гашения
пламени
в сухих огнепреградителях**



Огнепреградитель сухого типа:
устройство, устанавливаемое на пожароопасном технологическом аппарате или трубопроводе, свободно пропускающее поток газопаровоздушной смеси или жидкости через пламегасящий элемент и способствующее локализации пламени.



Классификация огнепреградителей:

1 По типу пламегасящего элемента:

- на сетчатые;
- кассетные;
- с пламегасящим элементом из гранулированного материала;
- с пламегасящим элементом из пористого материала.

2 По месту установки:

- на резервуарные или концевые (длина трубопровода, предназначенного для сообщения с атмосферой, не превышает трех его внутренних диаметров);
- коммуникационные (встроенные).

3 По времени сохранения работоспособности при воздействии пламени выделяют два класса:

- I класс - время не менее 1 ч;
- II класс - время менее 1 ч.



Искрогаситель сухого типа:

устройство, устанавливаемое на выхлопных коллекторах различных транспортных средств, силовых агрегатов и обеспечивающее улавливание и тушение искр в продуктах горения, образующихся при работе топок и двигателей внутреннего сгорания.

Искрогасители классифицируют по способу гашения искр и подразделяют:

- на динамические (выхлопные газы очищаются от искр под действием сил тяжести и инерции);
- фильтрационные (выхлопные газы очищаются путем фильтрации через пористые перегородки).



В основу действия всех сухих огнестойких преградителей положен принцип гашения пламени в узких каналах.

Гашение пламени в канале, заполненном горючей смесью, происходит при некоторой минимальной величине диаметра канала, определяемой

- химическим составом
- температурой
- давлением смеси

В связи с этим введено понятие "критический диаметр гашения пламени"



Критический диаметр гашения пламени $d_{кр}$ является характеристикой горючей газо- или паровоздушной смеси при определенной температуре и давлении и представляет собой минимальный диаметр канала, через который пламя еще может распространиться неограниченно.

Если в сухом огнепреградителе диаметр каналов для данной горючей смеси равен $d_{кр}$, то в зоне горения устанавливается равенство между тепловыделениями и теплопотерями.

Для того, чтобы огнепреградитель обеспечивал надежную локализацию пламени, диаметр его каналов необходимо принимать равным $0,5d_{кр}$. Критический диаметр определяется расчетом или опытным путем.



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



Газовый поток, проходя через пористый слой огнепреградителя, передает часть тепла стенкам канала, часть энергии расходуется на нагрев газовой смеси.

Уравнение теплового баланса при гашении пламени в узком канале можно записать следующим образом:

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (1)$$

Где Q - тепловыделение на пределе гашения пламени;
 Q_1 - теплота на нагревание продуктов горения от T_3 до T_r ;
 Q_2 - теплота от горючей среды к стенкам канала.



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



Согласно руководству по расчету основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, критический диаметр канала огнепреграждающего элемента определяется выражением

$$d = \frac{Pe \cdot R \cdot T \cdot \lambda}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M}$$

Pe — число Пекле;

R — универсальная газовая постоянная кДж/моль·К;

T — начальная температура газовой горючей смеси, К;

λ — теплопроводность горючей смеси, Вт/(м·К);

S_u — нормальная скорость распространения пламени, м/с;

C_p — теплоемкость газовой горючей смеси при постоянном давлении, кДж/(кг·К);

P — давление горючей смеси, Па;

M — молярная масса, кг/кмоль.



Вопрос №2

**Определение
критического диаметра гашения
пламени
в сухих огнепреградителях
по методике Киселёва Я.С.**



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



Я.Б. Зельдович установил, что на пределе гашения
пламени достигается постоянство безразмерного критерия
Пекле:

$$Pe = \frac{S_u d_{кр}}{a} = const \quad (1)$$

где s_u – нормальная скорость распространения пламени;

$d_{кр}$ – критический диаметр пламегасящих каналов;

a – коэффициент температуропроводности исходной

смеси.



Температуропроводность (коэффициент температуропроводности) — физическая величина, характеризующая скорость изменения (выравнивания) температуры вещества в неравновесных тепловых процессах, численно равна отношению теплопроводности к объёмной теплоёмкости при постоянном давлении, в системе СИ измеряется в $\text{м}^2/\text{с}$.

Этиловый спирт 7×10^{-8}



Размер критического диаметра пламегасящих каналов $d_{кр}$ вычисляется по формуле:

$$d_{кр} = \frac{Pe \cdot a}{S_u}, \quad (2)$$

где Pe – критерий Пекле ($Pe \approx 65$);

a – коэффициент температуропроводности исходной смеси;

S_u – нормальная скорость распространения пламени.



Коэффициент температуропроводности выражается следующей зависимостью:

$$a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \rho} \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности;

C_p – теплоемкость горючей смеси при постоянном давлении;

ρ – плотность горючей смеси.



Из уравнения состояния идеального газа имеем:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} R \cdot T$$

$$\Rightarrow P \cdot V = \frac{\rho \cdot V}{M} R \cdot T$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}$$

где P – давление горючей смеси;
 M – молярная масса горючей смеси;
 R – универсальная газовая постоянная;
 T – начальная температура смеси.



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



С учетом формул (3) и (4) выражение (2) запишется в более приемлемом виде для выполнения расчета критического диаметра пламегасящих каналов $d_{кр}$:

$$d_{кр} = \frac{Pe \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M} \quad (5)$$

Подставив численное значение критерия Пекле получаем:

$$d_{кр} = \frac{65 \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M} \quad (6)$$



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



Формула для определения $d_{кр}$ на основе модели гашения
пламени Киселева Я.С.

$$d_{кр} = \frac{2n \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M} \cdot \frac{F}{S} \quad (8)$$

- где n – относительный градиент ($n=2$)
 λ - теплопроводность материала, Вт/мК;
 F - площадь поверхности теплообмена огнегасящего
канала, м²;
 S - площадь поперечного сечения огнегасящего канала, м²;
 C_p – удельная теплоёмкость, кДж/ кгК;
 P - давление горючей смеси, Па;
 $T_3 = T_{св}$ - температура самовоспламенения, К;
 S_u – нормальная скорость распространения пламени м/с,



F - площадь поверхности теплообмена
огнегасящего канала, м^2 ;

S - площадь поперечного сечения
огнегасящего канала, м^2

Площадь поверхности теплообмена

$$F = \pi d * 4d = 4\pi d^2$$

Площадь сечения канала

$$S = \pi d^2 / 4$$

– для узкого канала с длиной $L = 4d_{\text{кр}}$.

$$F/S = 16$$



Подставляя в формулу (8) отношение $F / S = 16$,
получаем:

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 16 \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{Su \cdot C_p \cdot P \cdot M} \quad (9)$$
$$= \frac{64 \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{Su \cdot C_p \cdot P \cdot M}$$

При $n = 2$ значение критерия Пекле
составляет $Pe_{кр} = 64$



Если отношение $F / S = 1$
(для сетчатых огнепреградителей),
то получаем:

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M}$$

(10)

$$= \frac{4 \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M}$$



Из сравнения (10) с (9) видим что для гашения пламени одной и той же горючей смеси, размер гасящей ячейки у тонкой сетки должен быть в 16 раз меньше, чем у неограниченно длинного канала ($L \geq 4d$).

Это должно быть учтено при расчете сетчатых и канальных огнепреградителей.

Задача

Определить $d_{кр}$ огнегасящих каналов металлокерамического огнепреградителя на линии подачи вещества в компрессорную станцию.



Алгоритм решения задачи

1. Выбрать справочные данные для расчёта

Вещество : C_{p1} ; M_1 , S_u , λ_1

Воздух: $C_{p2} = 1,005$ кДж/кгК; $M_2 = 29$ кг/кмоль, $\lambda = 0,0256$ В т/мК, $T = 298$ К

2. Составляем уравнение реакции горения вещества в воздухе

3. Определяем мольные доли каждого компонента горючей смеси

$N = 1 + \beta(1 + 3,76)$, кмоль

$$n_1 = \frac{1}{N}$$

$$n_2 = 1 - n_1$$



4. Определяем теплоёмкость горючей смеси:

$$C_{p\text{см}} = n_1 C_{p1} + n_2 C_{p2} \text{ кДж/кгК}$$

5. Определяем молярную массу горючей смеси

$$M_{\text{см}} = n_1 M_1 + n_2 M_2 \text{ кг/кмоль}$$

6. Определяем теплопроводность горючей смеси

$$\lambda_{\text{см}} = n_1 \lambda_1 + n_2 \lambda_2, \text{ Вт/мК}$$



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Кафедра ПБТ

7 Согласно руководству по расчету основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, критический диаметр канала огнепреграждающего элемента определяется выражением

$$d = \frac{Pe \cdot R \cdot T \cdot \lambda}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M}$$

где Pe – число Пекле;

R — универсальная газовая постоянная кДж/моль·К;

T — начальная температура газовой горючей смеси, К;

λ — теплопроводность горючей смеси, Вт/(м·К);

S_u — нормальная скорость распространения пламени, м/с;

C_p — теплоемкость газовой горючей смеси при постоянном давлении, кДж/(кг·К);

P — давление горючей смеси, Па;

M – молярная масса, кг/кмоль.

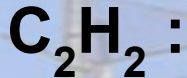
8. Расчет диаметра огнегасящего канала по формуле Я.С. Киселева

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot n \cdot \lambda \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M} \cdot \frac{F}{S}$$



Пример решения задачи для ацетилена:

1. Выбрать справочные данные для расчёта:



$$C_{p1} = 1,687 \text{ кДж/кгК};$$

$$M_1 = 26 \text{ кг/кмоль},$$

$$S_u = 1,57 \text{ м/с}$$

Воздух:

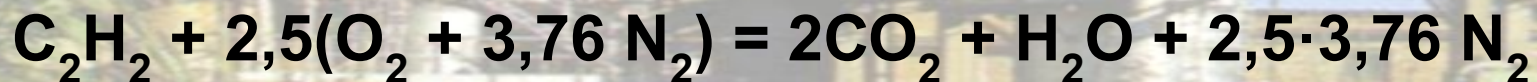
$$C_{p2} = 1,005 \text{ кДж/кгК};$$

$$M_2 = 29 \text{ кг/кмоль},$$

$$\lambda = 0,0256 \text{ Вт/мК},$$

$$T = 298 \text{ К}$$

2. Составить уравнение реакции горения C_2H_2 в воздухе





3. Определить мольные доли C_2H_2 и воздуха в горючей смеси

$N = 1 + 2,5(1 + 3,76) = 12,9$ кмоль-общее кол-во молей
Мольная доля C_2H_2 в горючей смеси составит:

$$n_1 = \frac{1}{N} = \frac{1}{12,9} = 0,0775$$

Мольная доля воздуха в горючей смеси составит:

$$n_2 = \frac{2,5(1 + 3,76)}{N} = \frac{11,9}{12,9} = 0,9225$$



4. Определить теплоёмкость горючей смеси:

$$C_{рсм} = n_1 C_{р1} + n_2 C_{р2} = 0,0775 \cdot 1,687 + 0,9225 \cdot 1,005 = 1,0578 \text{ кДж/кгК}$$

5. Определяем молярную массу горючей смеси:

$$M_{см} = n_1 M_1 + n_2 M_2 = 0,0775 \cdot 26 + 0,9225 \cdot 29 = 28,76 \text{ кг/кмоль}$$

Как видим из расчётов, молярная доля горючего в реакции горения очень мала (около 7,75%), поэтому расчёт следует вести **по воздуху.**



По методике Я.С. Киселева критический диаметр гашения пламени составит для канала длиной $4d$:

$$d_{кр} = \frac{2 \cdot n \cdot \lambda_g \cdot R \cdot T}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M_g} \cdot \frac{F}{S} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 16 \cdot 0,0256 \cdot 8,314 \cdot 298}{1,57 \cdot 1,0578 \cdot 10^5 \cdot 29} = 0,856 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,856 \text{ мм}$$

Согласно руководству по расчету основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов

$$d = \frac{Pe \cdot R \cdot T \cdot \lambda}{S_u \cdot C_p \cdot P \cdot M} = \frac{65 \cdot 8,314 \cdot 298 \cdot 0,0256}{1,57 \cdot 1,0578 \cdot 10^5 \cdot 29} = 0,856 \text{ мм}$$



КАФЕДРА ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ



№ п/п	Вещество	Брутто формула	Нормальная скорость распр. пламени, S_u , м/с	Начальная температура газовой смеси, Т, К	Давление горючей смеси Р, Па	Удельная теплоемкость C_p , при 25°С кДж/кгК
1	Ацетон	C_3H_6O	0,44	293	$1,01 \cdot 10^5$	1,297
2	Бензол	C_6H_6	0,48	303	$2,00 \cdot 10^5$	1,046
3	Гексан	C_6H_{14}	0,39	313	$3,00 \cdot 10^5$	1,660
4	Метан	CH_4	0,34	308	$2,50 \cdot 10^5$	2,227
5	Метанол	CH_4O	0,5	313	$3,00 \cdot 10^5$	1,542
6	Пропан	C_3H_8	0,46	303	$2,00 \cdot 10^5$	1,667
7	Этан	C_2H_6	0,48	298	$1,50 \cdot 10^5$	1,751
8	Этанол	C_2H_6O	0,56	303	$2,00 \cdot 10^5$	1,543