

Влияние начального давления на распространение фронта пламени в высокопористых металлах

С.В. Головастов, Г.Ю. Бивол, Ф.С. Кулешов, В.В. Голуб

Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия



Содержание

1. **Пористые материалы в процессах горения**
2. Экспериментальное исследование
 - Экспериментальная установка
 - Инфракрасная регистрация фронта пламени
 - Скорость фронта пламени
 - Динамика давления в канале
3. Сценарии распространения фронта пламени
4. Выводы

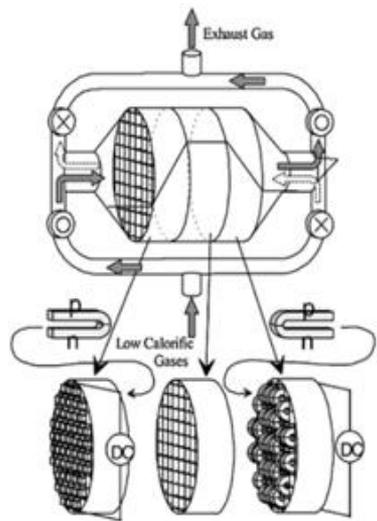
Пористые материалы в процессах горения

Очистка

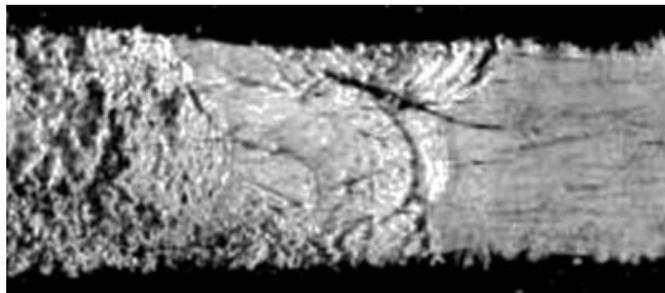
Стабилизация

Ускорение/интенсификация

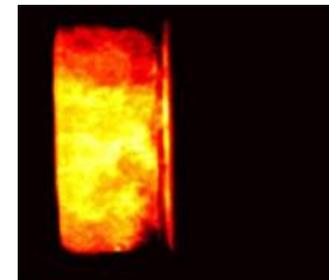
Гашение



Kamal 2005



Головастов 2021

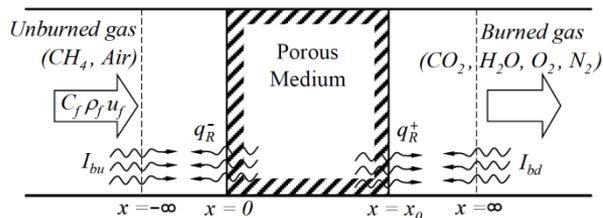


Nie 2011

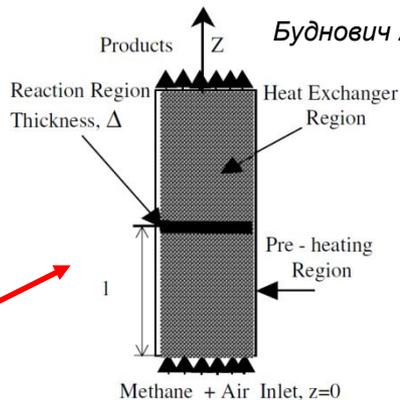
Hanamura 2005

Механизмы распространения фронта пламени

Krittacom 2009

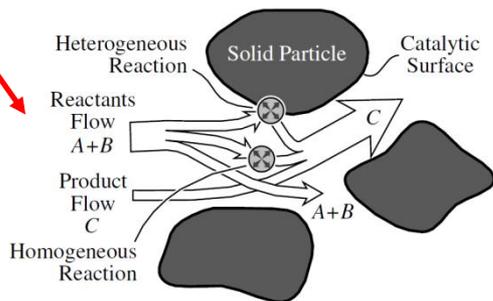


Буднович 2007

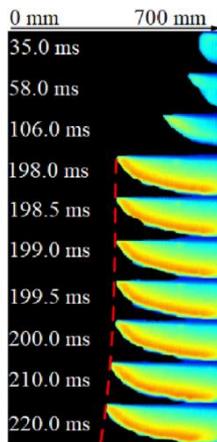


- излучение
- температура поверхности
- турбулентность
- тепломассообмен
- гидравлическое сопротивление
- термоакустическая неустойчивость
- гетерогенные реакции

Режимы фильтрационного горения по Пинаеву (1989):



Oliviera 2001



Miao 2022

Режим	Скорость	P/P_0
Низких скоростей	0 – 1 м/с	~1
Медленного горения	0,1 – 10 м/с	~1
Быстрого горения	20 – C_{sound}	1/2 – 5
Сверхзвукового горения, детонации	$C_{\text{sound}} - S_{\text{Ch-J}}$	5 – 10

Пористая перегородка в качестве пламегасителя

Состояние канала	Смесь	Материал	Количество пор/волокон на дюйм	Итог
Закрит (Wen, 2013, 2020)	Метан - воздух	SiC	10 пнд, 20 мм	Горение
		Al	10 пнд, 20 мм	Гашение
Закрит (Jin, 2020)	Метан - воздух	Стальная сетка	20 пнд , 1 слой	Горение
			30 внд, 1 слой	Гашение
Полу-открыт (Dai, 2020)	Пшеничная пыль – воздух	Стальная сетка	60 внд , 2 слоя	Гашение
			50 внд, 2 слоя	Горение
Закрит (Duan, 2021)	Метан - воздух	SiC	10 пнд, 20 мм	Горение
			30 пнд, 20 м	Гашение

Как правило, максимальное количество пор/волокон на дюйм колеблется в диапазоне 10-40

Цель работы

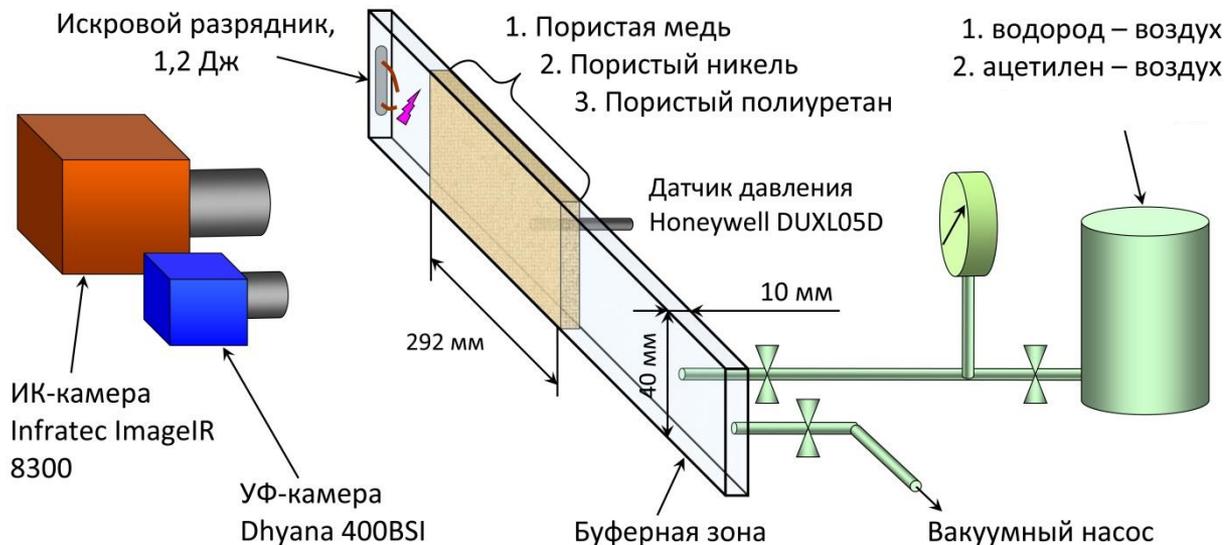
Определение динамики фронта пламени внутри пористой среды в зависимости от:

- типа горючего;
- начального давления;
- состава смеси;
- материала пористой среды.

Содержание

1. Пористые материалы в процессах горения
- 2. Экспериментальное исследование**
 - Экспериментальная установка**
 - Инфракрасная регистрация фронта пламени
 - Скорость фронта пламени
 - Динамика давления в канале
3. Сценарии распространения фронта пламени
4. Выводы

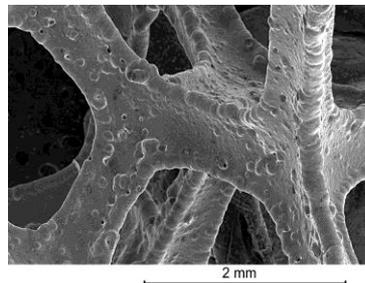
Экспериментальная установка



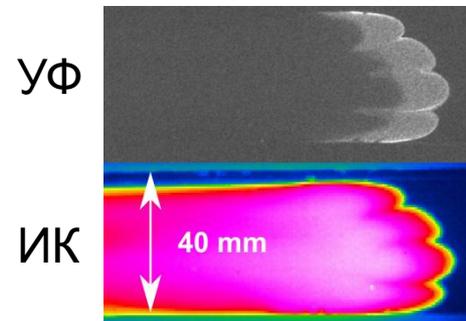
Средний линейный размер пор составлял:
3,5 мм – для меди и никеля
2,5 мм – для полиуретана

Мольный избыток горючего φ варьировался:
0,3–1,0 (водород); 0,6–0,8 (ацетилен)

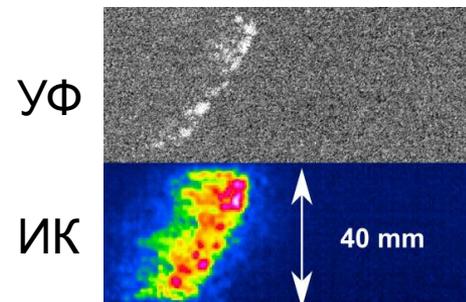
Пористая медь



Пустой канал



Пористая медь



Содержание

1. Пористые материалы в процессах горения

2. Экспериментальное исследование

Экспериментальная установка

Инфракрасная регистрация фронта пламени

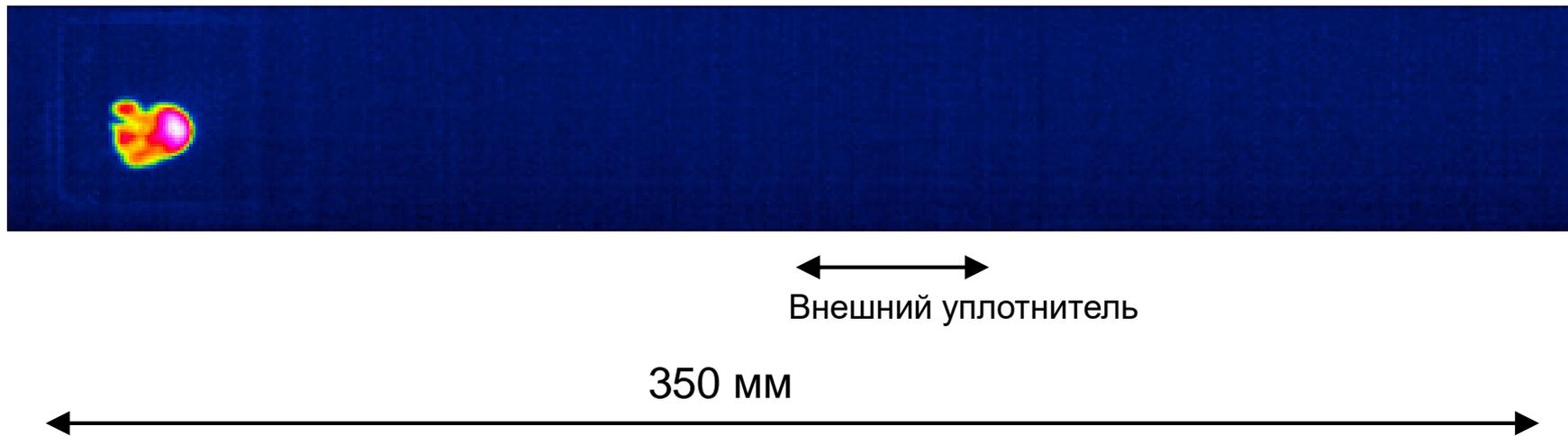
Скорость фронта пламени

Динамика давления в канале

3. Сценарии распространения фронта пламени

4. Выводы

Инфракрасная регистрация фронта пламени в пустом канале

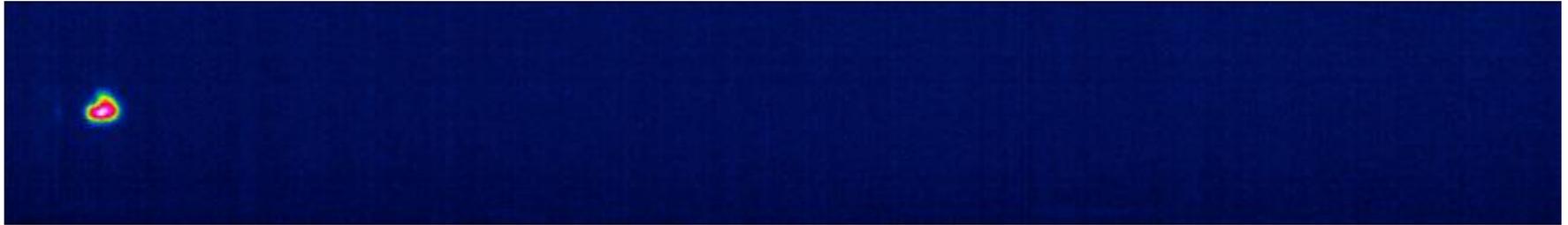


В пустом канале фронт пламени распространяется по всей длине канала
для водородно-воздушных и ацетилено-воздушных смесей

В канале с пористым металлом зарегистрированы три сценария

Инфракрасная регистрация фронта пламени

1. Ускорение фронта пламени с последующим гашением



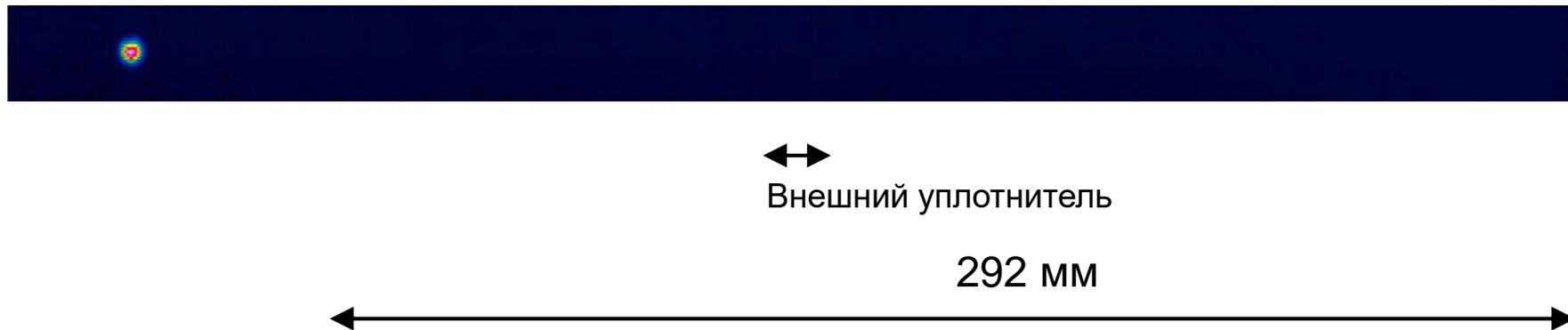
Внешний уплотнитель

292 мм



Инфракрасная регистрация фронта пламени

2. Непрерывное ускорение фронта пламени



Водород-воздух, $\varphi = 0,5$, $P_0 = 60$ кПа, $T_0 = 300$ К. Пористый никель

Инфракрасная регистрация фронта пламени

3. Медленное горение со скоростью ниже 1 м/с



Внешний уплотнитель

292 мм



Водород-воздух, $\varphi = 0,3$, $P_0 = 60$ кПа, $T_0 = 300$ К. Пористая медь

Содержание

1. Пористые материалы в процессах горения

2. Экспериментальное исследование

Экспериментальная установка

Инфракрасная регистрация фронта пламени

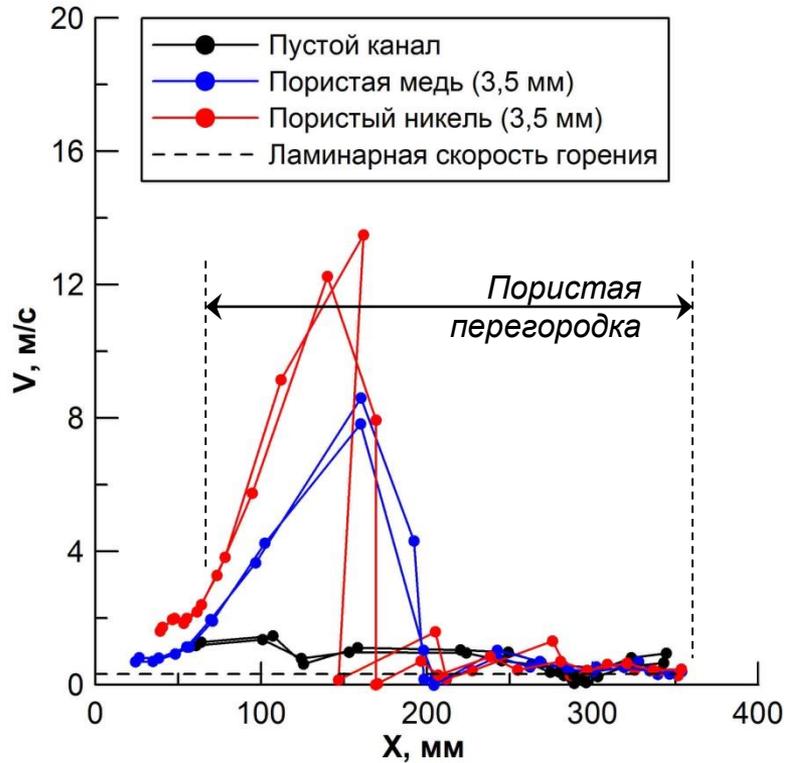
Скорость фронта пламени

Динамика давления в канале

3. Сценарии распространения фронта пламени

4. Выводы

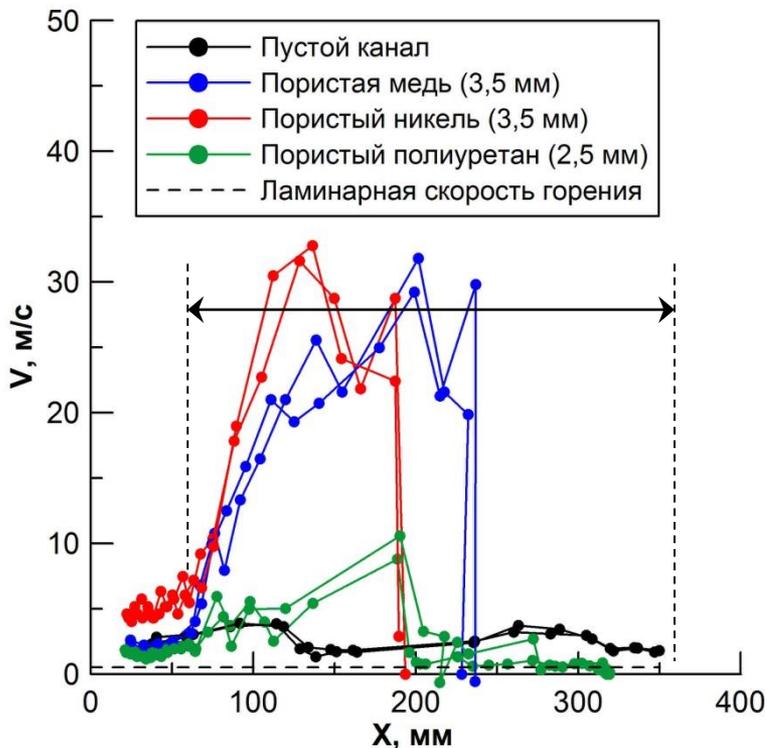
Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для бедной смеси $\varphi = 0,3$



После первоначального ускорения до 8–12 м/с в пористом металле фронт пламени замедляется до такой скорости, которая характерна для пустого канала.

В бедной смеси ($\varphi = 0,3$, 11% H_2) скорость фронта пламени в пористом никеле превышала скорость пламени в пористой меди на 30%.

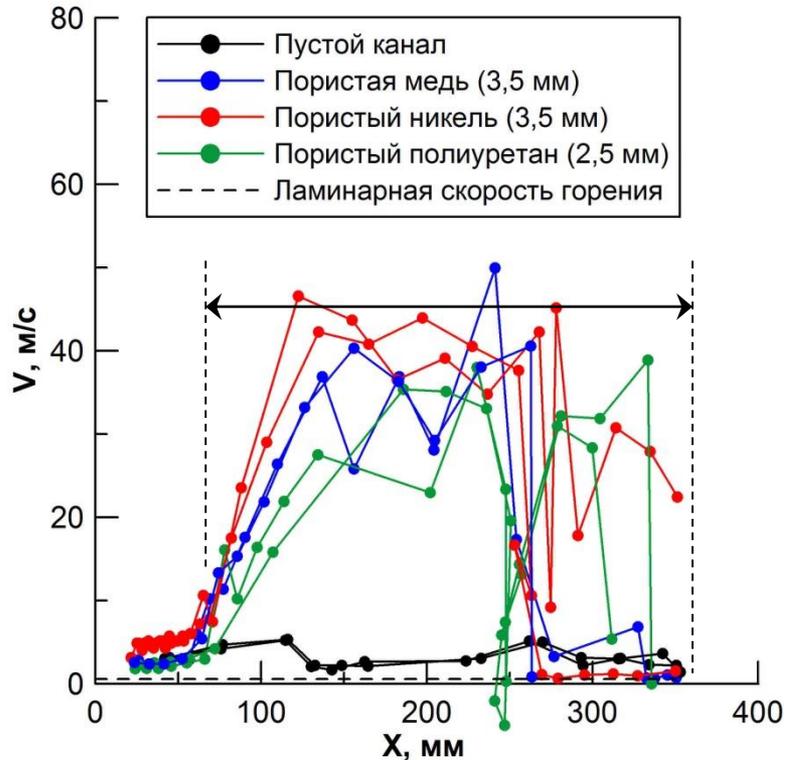
Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для бедной смеси $\varphi = 0,4$, $P_0 = 50$ кПа



Несмотря на гораздо более высокую максимальную скорость, горение в пористом металле, в итоге, гаснет.

Использование пористого полиуретана с меньшими порами 2,5 мм привело к снижению максимальной скорости фронта пламени.

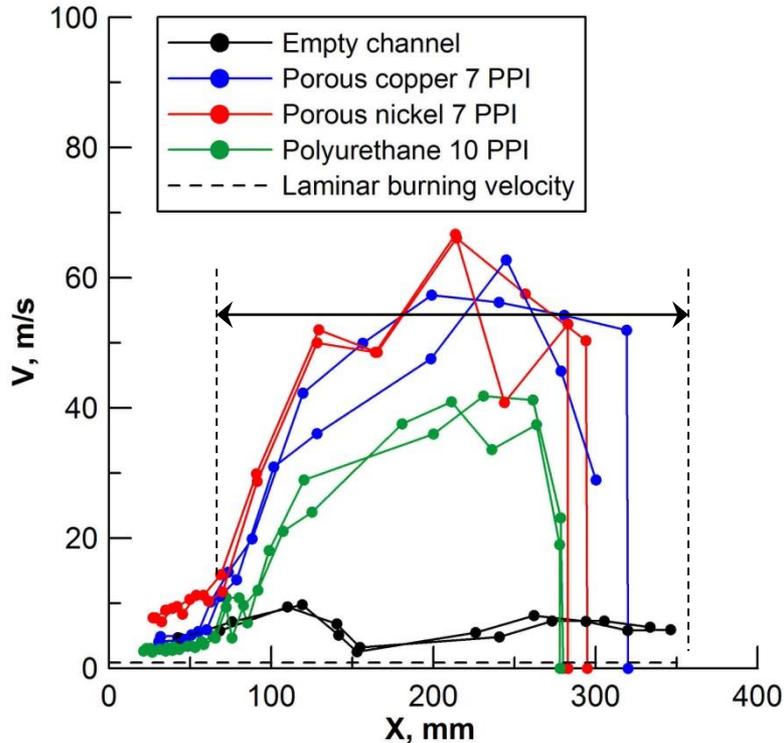
Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для смеси $\varphi = 0,4$, $P_0 = 70$ кПа



При повышении давления максимальная скорость фронта пламени примерно в 5 раз выше в пористом металле по сравнению со скоростью в пустом канале.

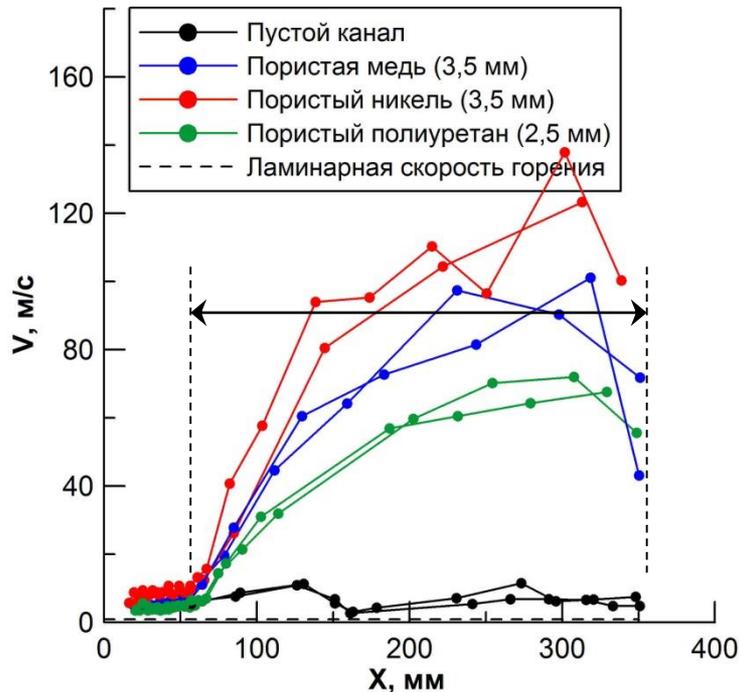
Гашение не происходит.

Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для смеси $\varphi = 0,5$, $P_0 = 50$ кПа



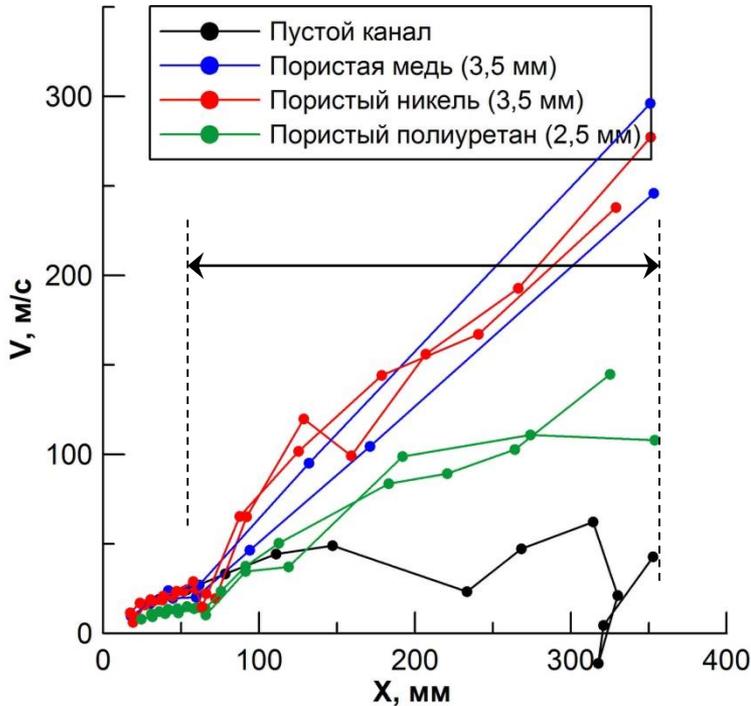
Увеличение концентрации водорода до 17% ($\varphi = 0,5$) приводит к тому, что скорости фронта пламени в пористой меди и в пористом никеле становятся сравнимыми, несмотря на то, что медь имеет более высокую теплопроводность.

Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для смеси $\varphi = 0,5$, $P_0 = 70$ кПа



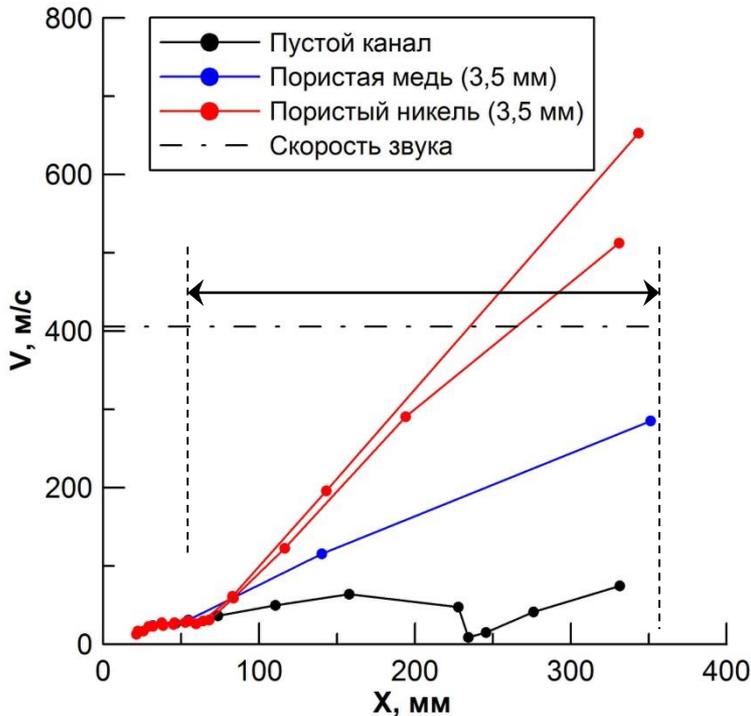
При мольном избытке водорода 0,5 и при начальном давлении 70 кПа скорость фронта пламени в пористом металле возрастает на порядок, с 10 м/с до 80-120 м/с.

Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для смеси $\varphi = 1,0$, $P_0 = 40$ кПа



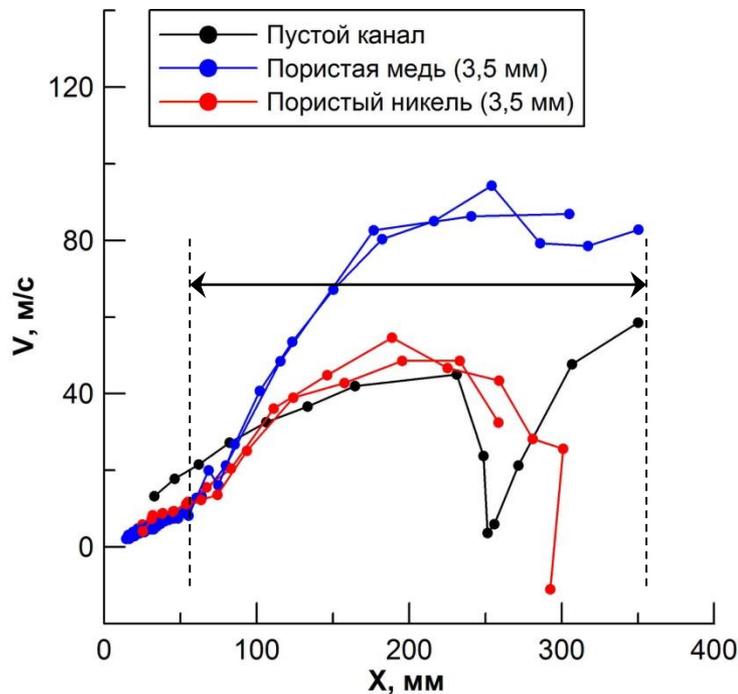
При использовании смеси с мольным избытком водорода 1,0 и при начальном давлении 40 кПа фронт пламени ускоряется до 300 м/с в пористом металле, тогда как в пустом канале скорость фронта пламени достигала 50 м/с.

Влияние тип материала на скорость фронта пламени в пористом металле для смеси $\varphi = 1,0$, $P_0 = 50$ кПа



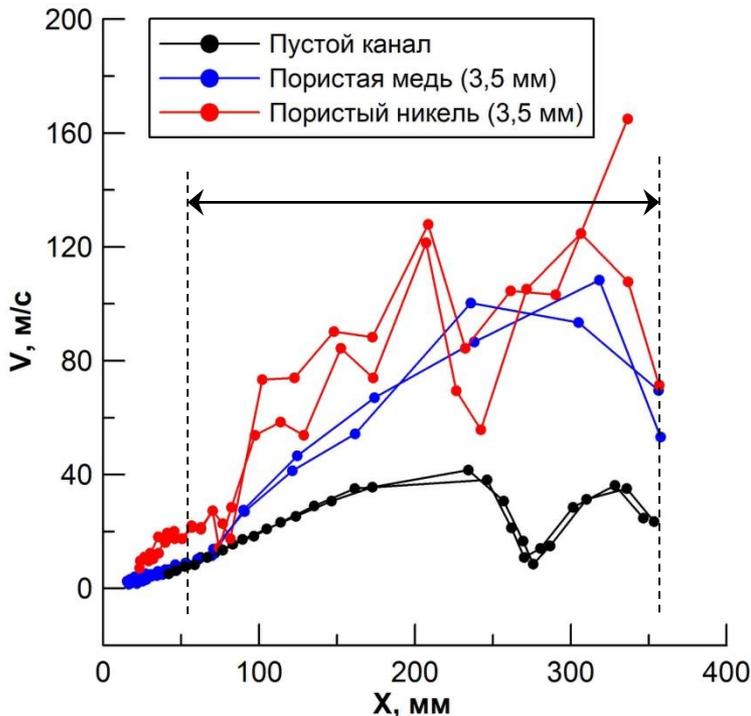
При использовании смеси с мольным избытком водорода 1,0 и при начальном давлении 50 кПа фронт пламени ускоряется до 600 м/с в пористых металлах, тогда как в пустом канале скорость фронта пламени достигала 80 м/с.

Влияние тип материала на скорость фронта пламени ацетилена в пористом металле для смеси $\varphi = 0,6$, $P_0 = 70$ кПа



В бедной смеси ацетилена с воздухом ($\varphi = 0,6$) динамика скорости пламени в пористом никеле и в пустом канале сравнимы. Максимальное ускорение происходит в пористой меди.

Влияние тип материала на скорость фронта пламени ацетилена в пористом металле для смеси $\varphi = 0,8$, $P_0 = 50$ кПа



При увеличении концентрации ацетилена скорости в пористой меди и в пористом никеле становятся сравнимыми. При этом максимальная скорость фронта пламени также выше в пористых каналах по сравнению с пустым каналом.

Содержание

1. Пористые материалы в процессах горения

2. Экспериментальное исследование

Экспериментальная установка

Инфракрасная регистрация фронта пламени

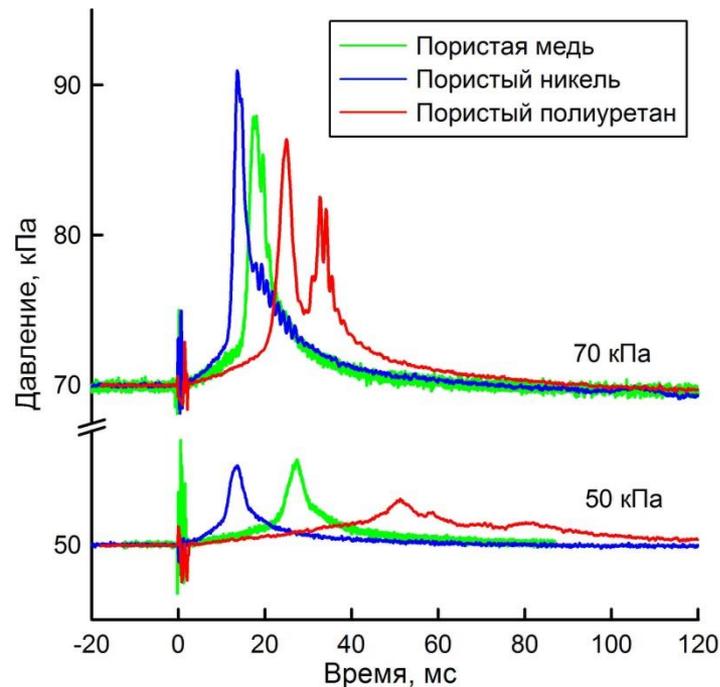
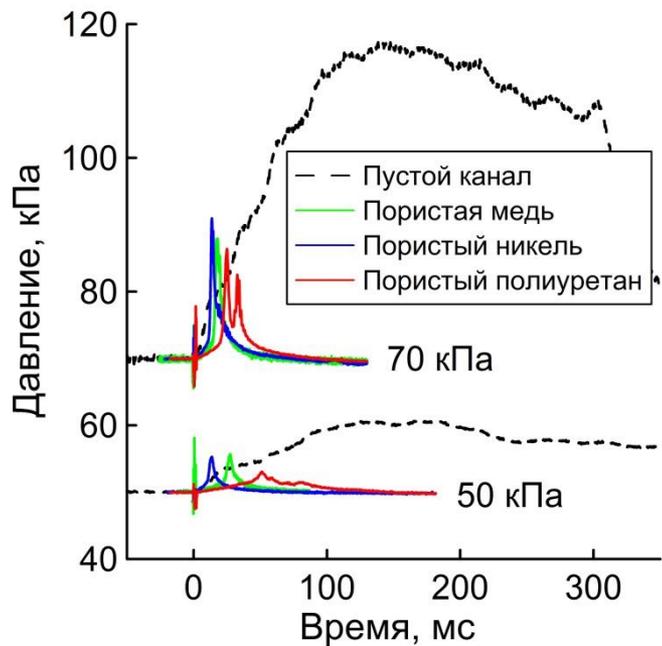
Скорость фронта пламени

Динамика давления в канале

3. Сценарии распространения фронта пламени

4. Выводы

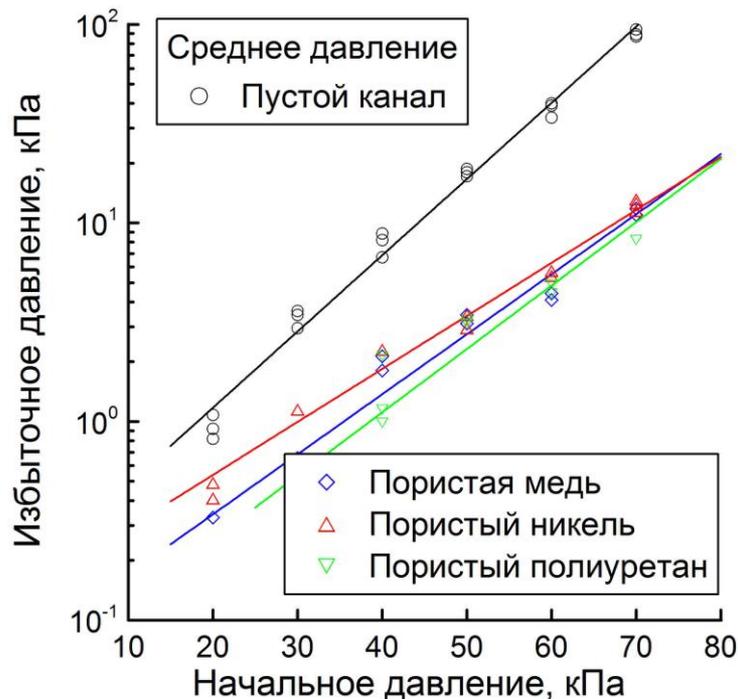
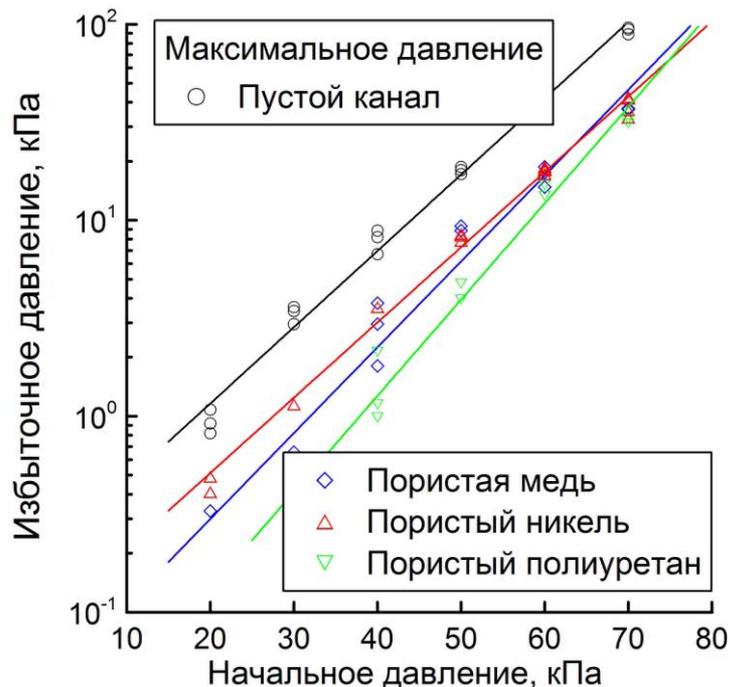
Динамика давления в канале с пористым материалом и в пустом канале



Давление в пористой среде уменьшается в несколько раз.

Водород-воздух, $\varphi = 0,5$, $P_0 = 50-70$ кПа, $T_0 = 300$ К.

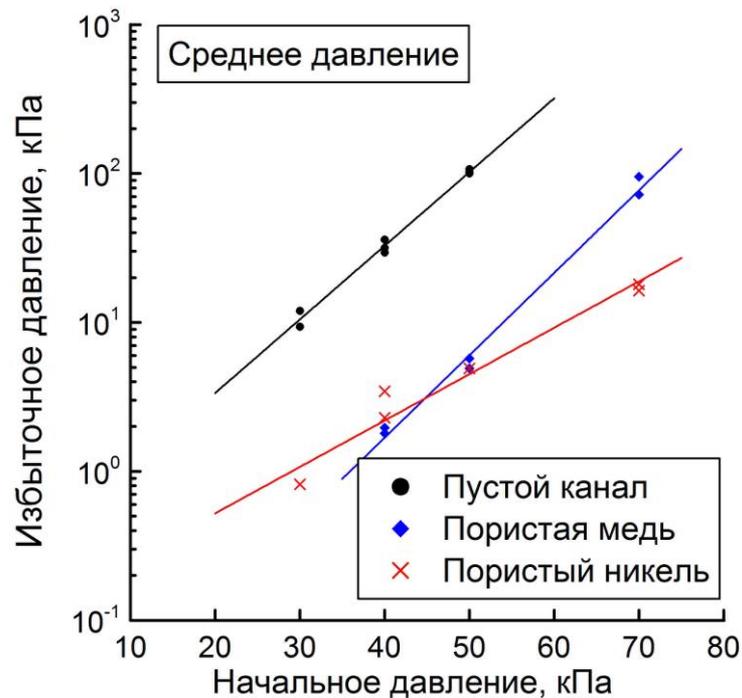
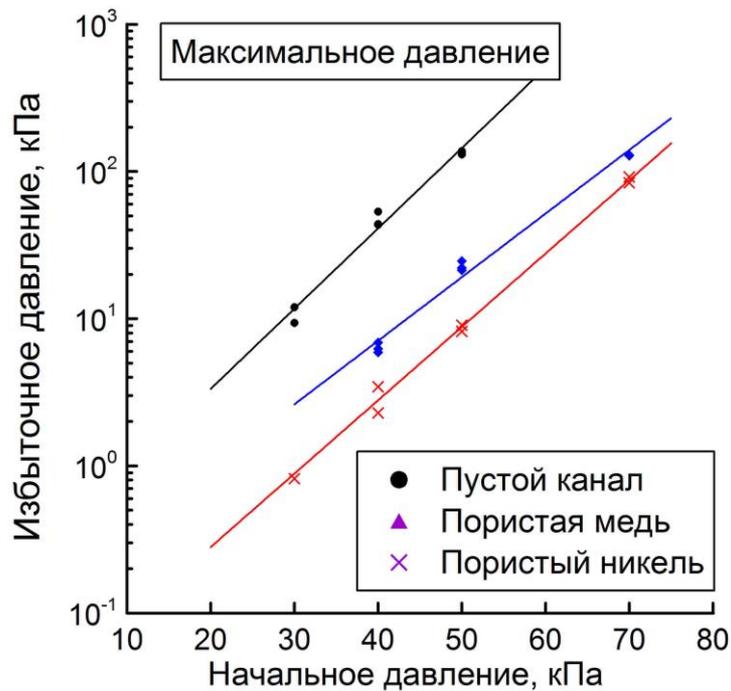
Избыточное давление в водородно-воздушной смеси



Избыточное давление экспоненциально зависит от начального давления.

Водород-воздух, $\varphi = 0,6$, $P_0 = 20-70$ кПа, $T_0 = 300$ К.

Избыточное давление в ацетилено-воздушной смеси



Избыточное давление экспоненциально зависит от начального давления.

Ацетилен-воздух, $\varphi = 0,6$, $P_0 = 30-70$ кПа, $T_0 = 300$ К.

Содержание

1. Пористые материалы в процессах горения
2. Экспериментальное исследование
 - Экспериментальная установка
 - Инфракрасная регистрация фронта пламени
 - Скорость фронта пламени
 - Динамика давления в канале
- 3. Сценарии распространения фронта пламени**
4. Выводы

Сценарии распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси в пустом канале

	Мольный избыток водорода			
P_0 , кПа	$\varphi = 0,3$	$\varphi = 0,4$	$\varphi = 0,5$	$\varphi = 1,0$
20	Нет воспламенения	Горение	Горение	Горение
30	Горение	Горение	Горение	Горение
40	Горение	Горение	Горение	Горение
50	Горение	Горение	Горение	Горение
60	Горение	Горение	Горение	
70	Горение	Горение	Горение	

Фронт пламени распространяется на всю длину канала во всех случаях

Сценарии распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси в канале с пористой медью

P_0 , кПа	Мольный избыток водорода			
	$\varphi = 0,3$	$\varphi = 0,4$	$\varphi = 0,5$	$\varphi = 1,0$
20		6	10	22
30	9	14	23	53
40	14	24	39	88
50	21	33	56	128
60	28	46	75	
70	35	59	95	

Увеличение начального давления или концентрации водорода приводило к повышению вероятности распространения пламени.

Числа Пекле при различных сценариях:

1. Гашение горения при $Pe = 6-23$; $Pe = 46-56$

2. Ускорение фронта пламени при $Pe > 59$

3. Медленное пламя при $Pe = 24-39$

$$Pe = \frac{U_n d_p}{k}$$

U_n – нормальная скорость горения,
 d_p – средний размер пор,
 k – температуропроводность. 30

Сценарии распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси в канале с пористым никелем

	Мольный избыток водорода			
P_0 , кПа	$\varphi = 0,3$	$\varphi = 0,4$	$\varphi = 0,5$	$\varphi = 1,0$
20	Нет воспламенения	Гашение (6)	Гашение (10)	Гашение (22)
30	Гашение (9)	Гашение (14)	Гашение (23)	Гашение (53)
40	Гашение (14)	Гашение (24)	Гашение (39)	Горение (88)
50	Гашение (21)	Гашение (33)	Гашение (56)	Горение (128)
60	Медленное пламя (28)	Медленное пламя (46)	Горение (75)	
70	Медленное пламя (35)	Медленное пламя (59)	Горение (95)	

Сценарии распространения пламени в пористом никеле были аналогичны сценариям пористой меди.

Сценарии распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси в канале с пористым полиуретаном

	Мольный избыток водорода			
P_0 , кПа	$\varphi = 0,3$	$\varphi = 0,4$	$\varphi = 0,5$	$\varphi = 1,0$
20	Нет воспламенения	Гашение (3)	Гашение (6)	Гашение (16)
30	Гашение (5)	Гашение (10)	Гашение (16)	Гашение (37)
40	Гашение (10)	Гашение (17)	Гашение (27)	Горение (62)
50	Гашение (15)	Медленное пламя (24)	Гашение (39)	
60	Гашение (20)	Гашение (32)	Гашение (53)	
70	Гашение (25)	Гашение (41)	Горение (66)	

Размещение пористого полиуретана приводит к гашению горения, несмотря на его более низкую теплопроводность. Гашение происходит из-за меньшего размера пор: 2,5 мм для полиуретана вместо 3,5 мм для металла.

Сценарии распространения фронта пламени в ацетилено-воздушных и метано-воздушных смесях в канале с пористой медью

Ацетилено-воздушные смеси		
P_0 , кПа	$\varphi = 0,6$	$\varphi = 0,8$
20 кПа	Нет воспл.	Гашение
30–60 кПа	Гашение	Гашение
70 кПа	Горение	Горение

Метано-воздушные смеси		
P_0 , кПа	$\varphi = 0,8$	$\varphi = 1,0$
<30 кПа	Нет воспл.	Нет воспл.
40–50 кПа	Нет воспл.	Гашение
60–70 кПа	Гашение	Гашение

Выводы

- Проведена комплексная визуализация фронта пламени при распространении внутри высокопористого металла в ИК и УФ диапазонах.
- Зарегистрированы три различных сценария распространения пламени: ускорение пламени, гашение пламени и медленное пламя.
- Заполнение канала пористым материалом приводило к снижению избыточного давления.
- Определены условия гашения при прохождении через пористую среду. Обнаружено, что критическое число Пекле для ускорения пламени составляет 59 для смеси водорода и воздуха.
- Результаты могут быть использованы для оценок взрывобезопасности при разработки пассивных методов тушения пламени.

Спасибо за внимание!