

«XIII ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

Снежинск, 20–24 марта 2017 г.



РЕЖИМЫ СВЕРХЗВУКОВОГО И ДЕТОНАЦИОННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В КАНАЛАХ

Киверин А.Д., Яковенко И.С., Иванов М.Ф.

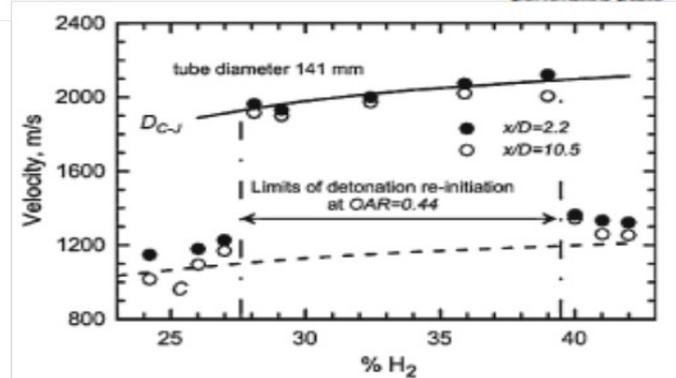
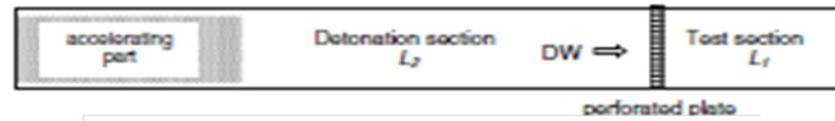
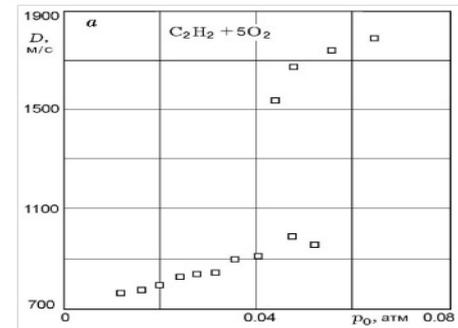
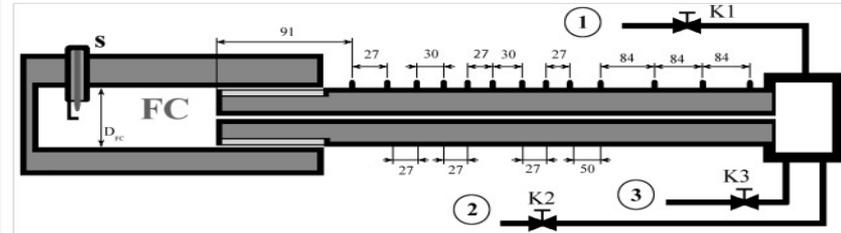
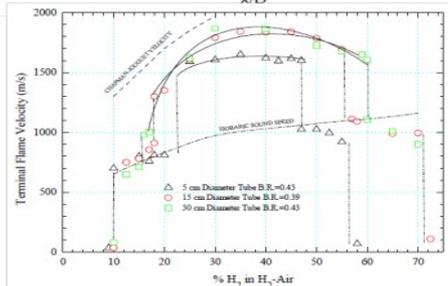
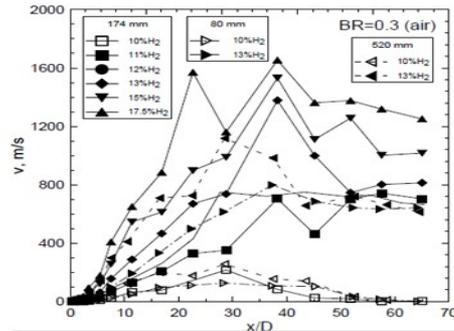
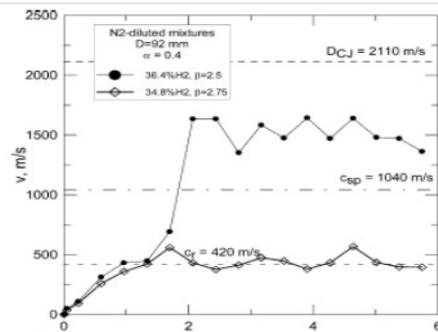
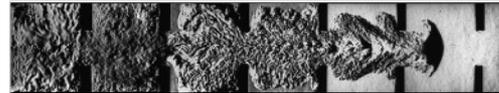
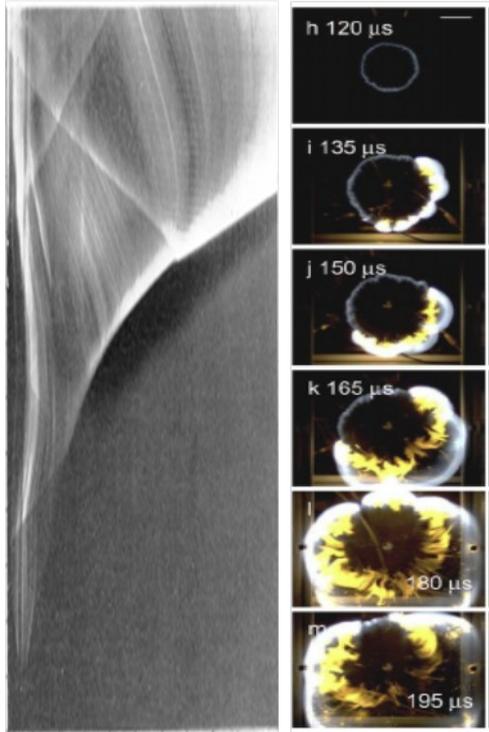
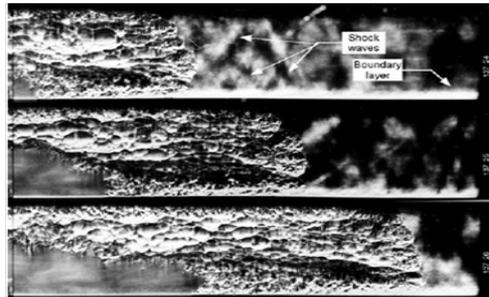


Объединенный институт высоких температур
Российская академия наук
Лаборатория Математического моделирования

План доклада

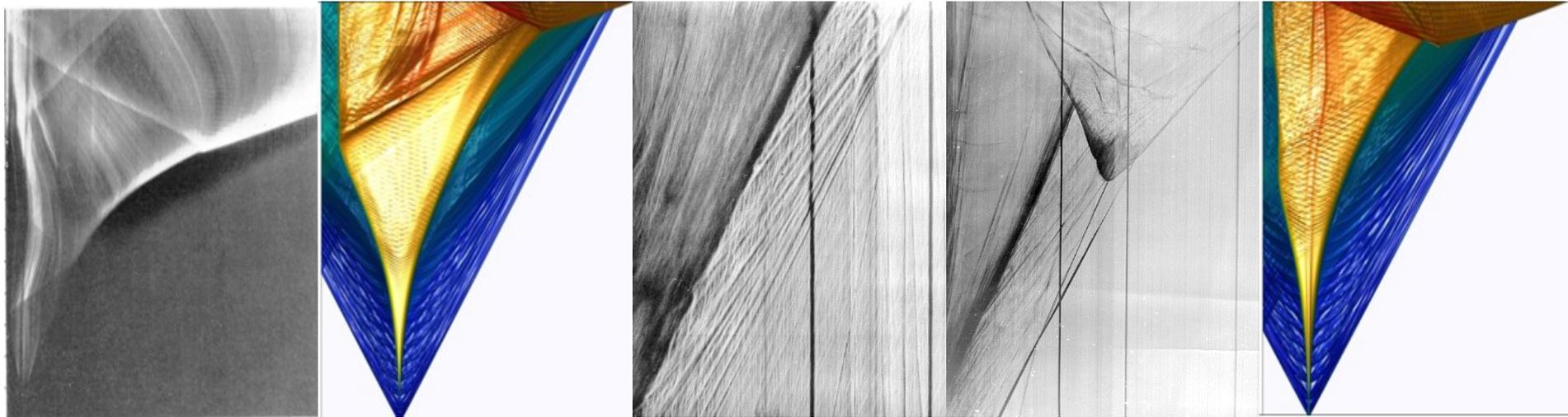
- Экспериментальные факты. Ускорение пламени, детонация и сверхзвуковое «запертое» пламя в канале;
- Газодинамический предел ускорения потока;
- Характер сжатия горючей смеси при распространении пламени в канале;
- Рост скорости горения при сжатии как механизм ускорения «запертого» пламени;
- Два механизма распространения пламени по сжатой среде.
- Заключение

Экспериментальные факты



Экспериментальные факты

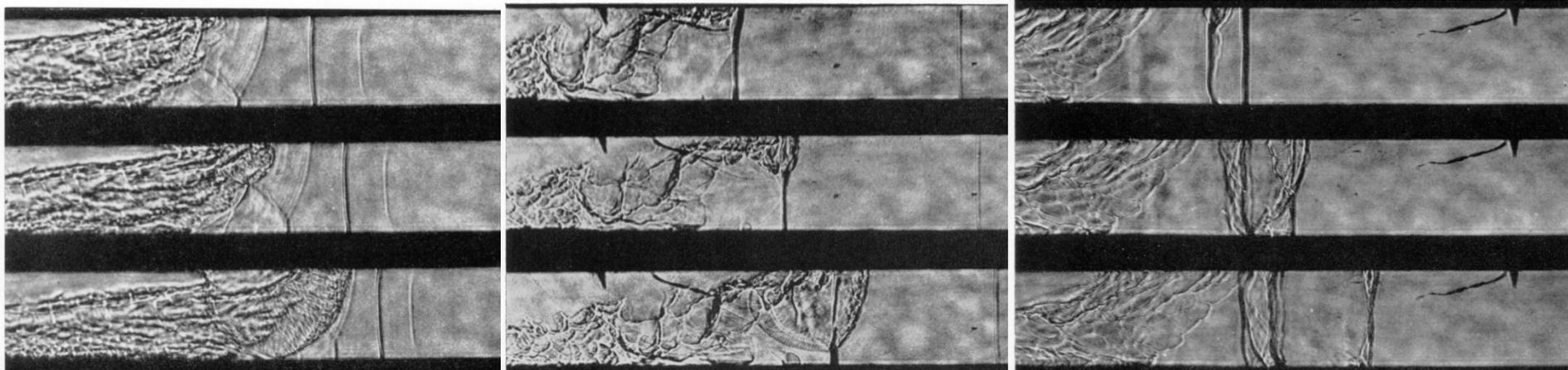
- Ускоренное в канале пламя прежде чем сформировать устойчивую детонацию проходит стадию так называемого «запертого пламени» (*choked flame*).
- Детонация возникает либо на фронте запертого пламени, либо на контактном разрыве впереди фронта.
- Детонация формируется только в высокоактивных смесях.

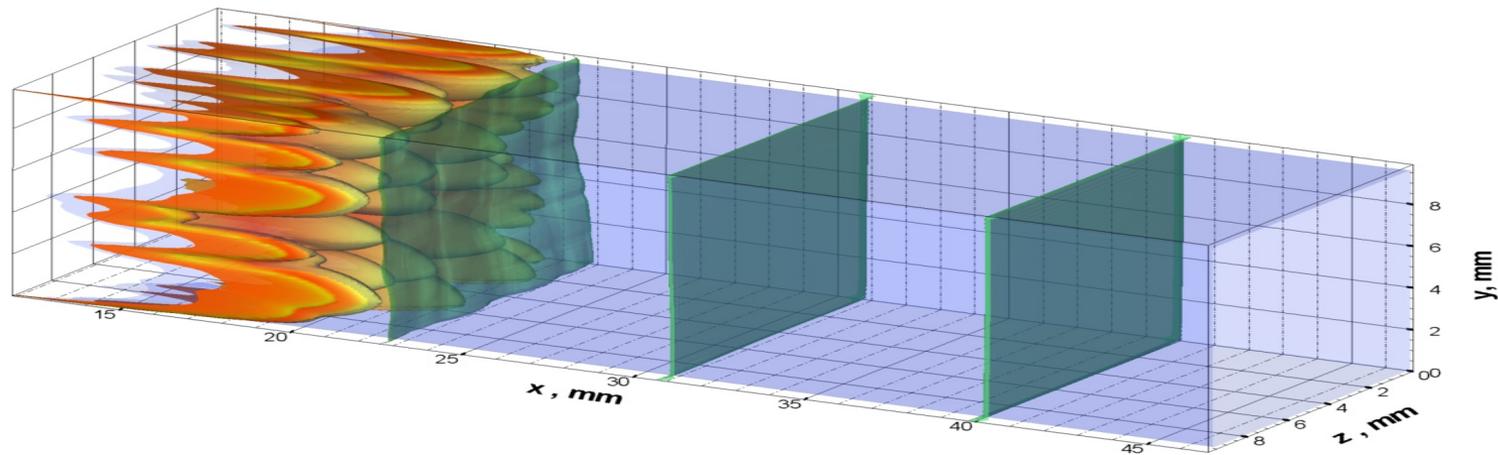


Основные вопросы

**необходимые для построения критериев
возникновения детонации**

- **Каковы базовые механизмы ускорения пламени в канале?**
- **Какова природа режима запертого пламени?**
- **Какова структура запертого пламени и каковы условия устойчивости такой структуры?**
- **Какова природа контактных разрывов, возникающих впереди запертого пламени?**
- **Каковы роли особенностей формирующихся течений и химической кинетики?**





Ускорение пламени в канале

Salamandra G.D., Bazhenova T.Y., Naboko I.M.// Proc. Combust. Inst. 1959. 7. С. 851.

Зельдович Я.Б.// ЖТФ. 1947. Т. 17. В. 1. С. 3.

Kurylo J., Dwyer H.A., Oppenheim A.K.// AIAA J. 1980. V. 18. № 3. P. 302-308.

Deshaies B., Joulin G.// Comb. and flame. 1989. 77. P. 201-212.

Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А., Фортов В.Е.// ДАН. 2010. Т.434. №6. С.756.

Ivanov M.F., Kiverin A.D., Liberman M.A.// Phys. Rev. E. 2011. 83. 056313.

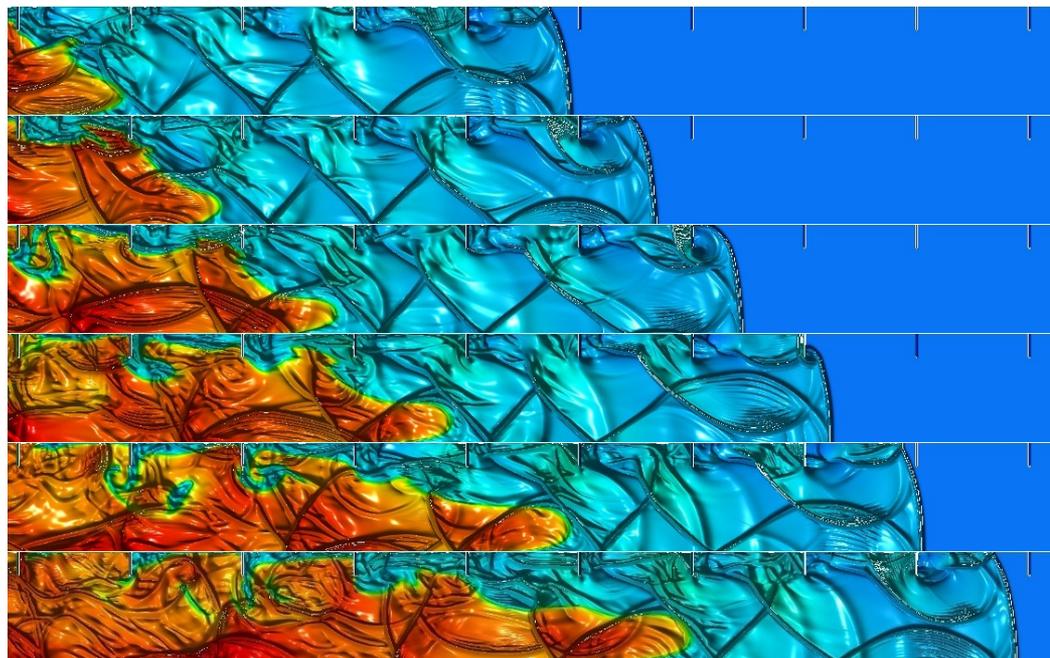
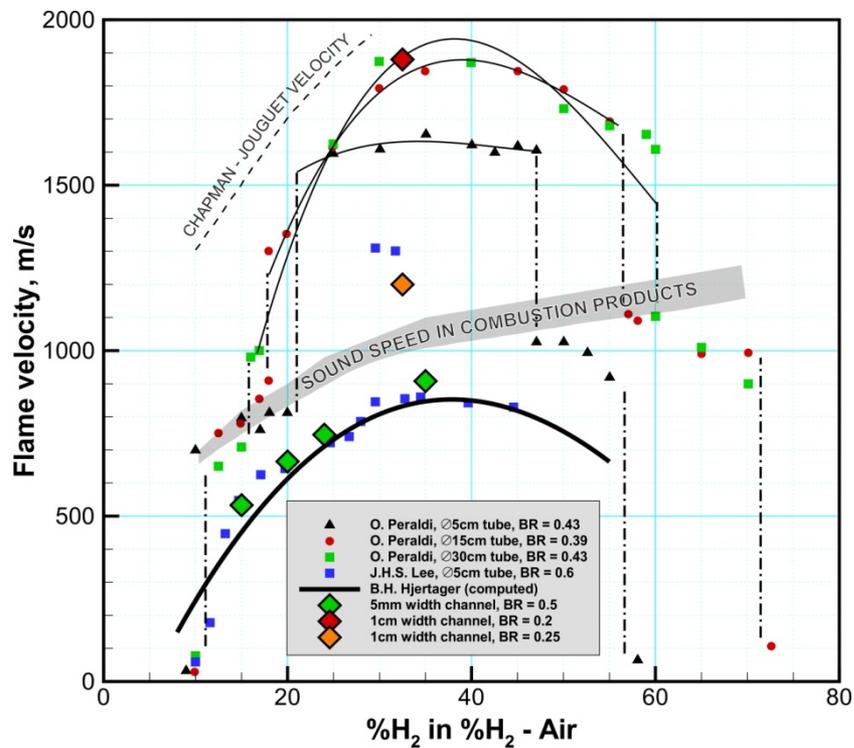
Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S., Liberman M.A.// IJHE. V. 38, Is. 36, 2013, P. 16427.

Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Клумов Б.А., Фортов В.Е.// УФН. 184, 2014, С. 247.

Иванов М.Ф., Киверин А.Д.// ТВТ, 2015, Т. 53, В. 5, С. 703.

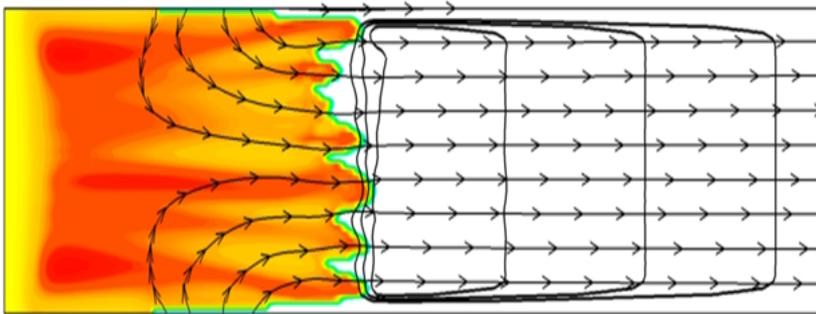
Kiverin A.D., Yakovenko I.S.// JP: Conf. Ser., 2015. V. 653. #012061.

Около- и сверхзвуковые пламена в каналах и трубах



Газодинамический предел ускорения реагирующего потока

- Независимо от геометрии канала ведущим физическим механизмом, определяющим ускорение пламени, является сгорание смеси и расширение продуктов горения в ограниченном объеме.
- Это определяет ускорение потока вдоль стенок канала и вытягивание фронта пламени в потоке.



$$\left. \begin{aligned} U_{f(L)} &= U_f + u_f \\ U_{f(L)} &= \Delta V / S \Delta t \\ \Delta u_f &\sim \Delta V \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} U_{f(L)} &\sim \Delta U_{f(L)} \\ U_{f(L)} &\sim \exp(\alpha t) \end{aligned}$$

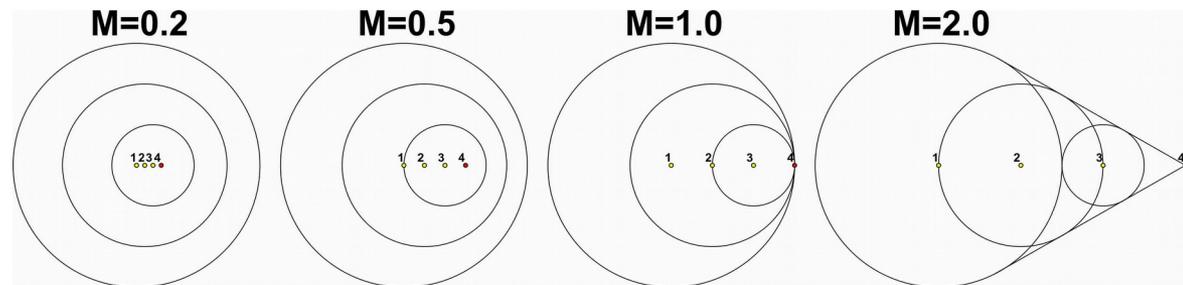
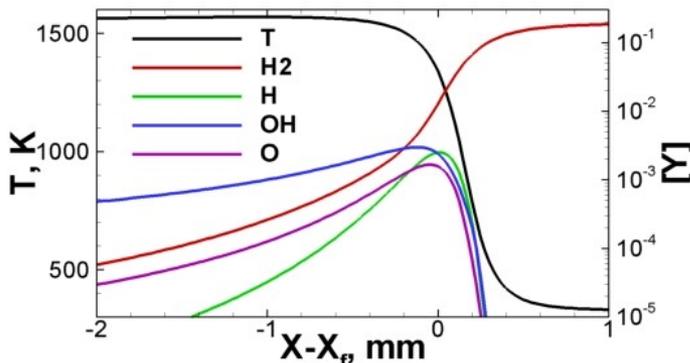
- Естественным ограничением скорости потока в канале в присутствии зоны энерговыведения (фронта пламени) является скорость звука.

$$(M^2 - 1) \frac{\Delta u}{u} = -(\gamma - 1) \frac{\Delta q}{a^2}$$

Два механизма сжатия смеси при распространении пламени

- Расширяющиеся в ограниченном объеме продукты горения вытесняют газ вперед вдоль стенок канала. Собственно этот механизм и определяет в большей степени ускорение потока на начальных стадиях.
- Энергия, выделяемая внутри зоны реакции (фронта пламени) переносится акустическими волнами из зоны реакции и передается газу.

Распространяющаяся пламя \Leftrightarrow движущийся источник энергии.



Характер сжатия горючей смеси

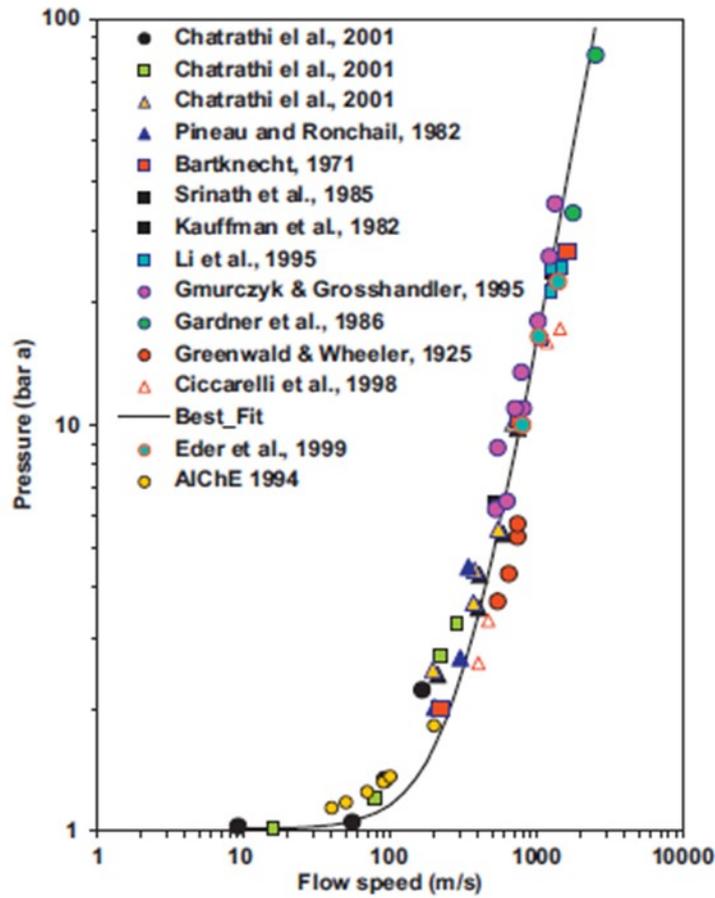
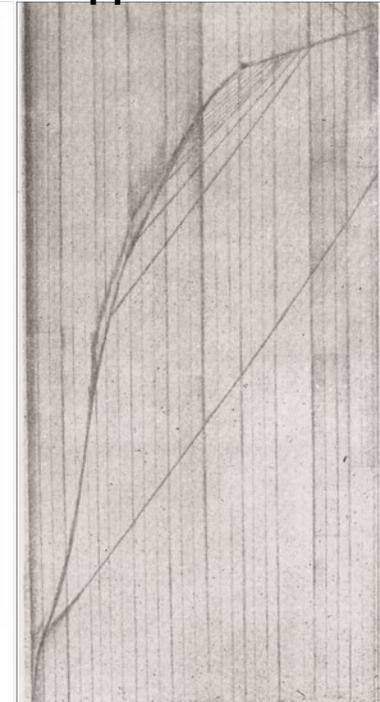
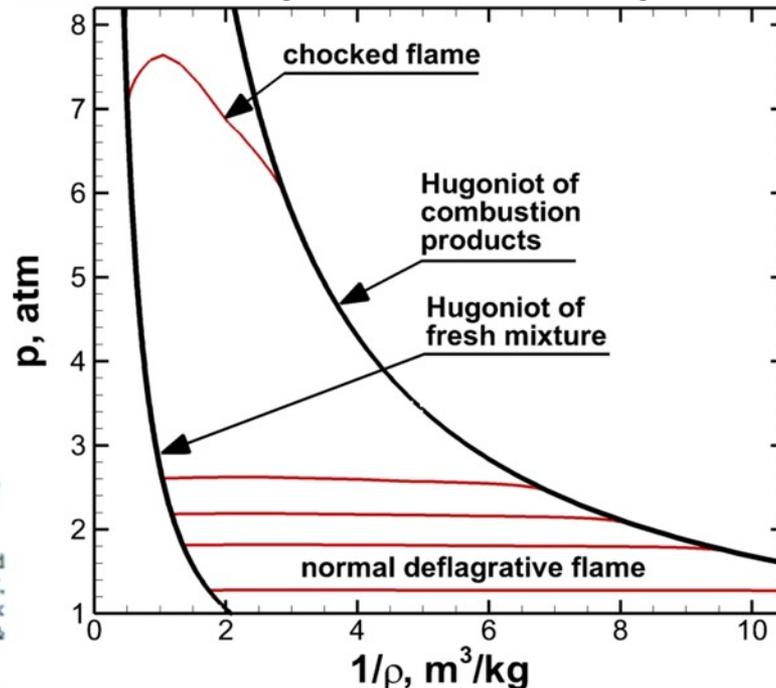


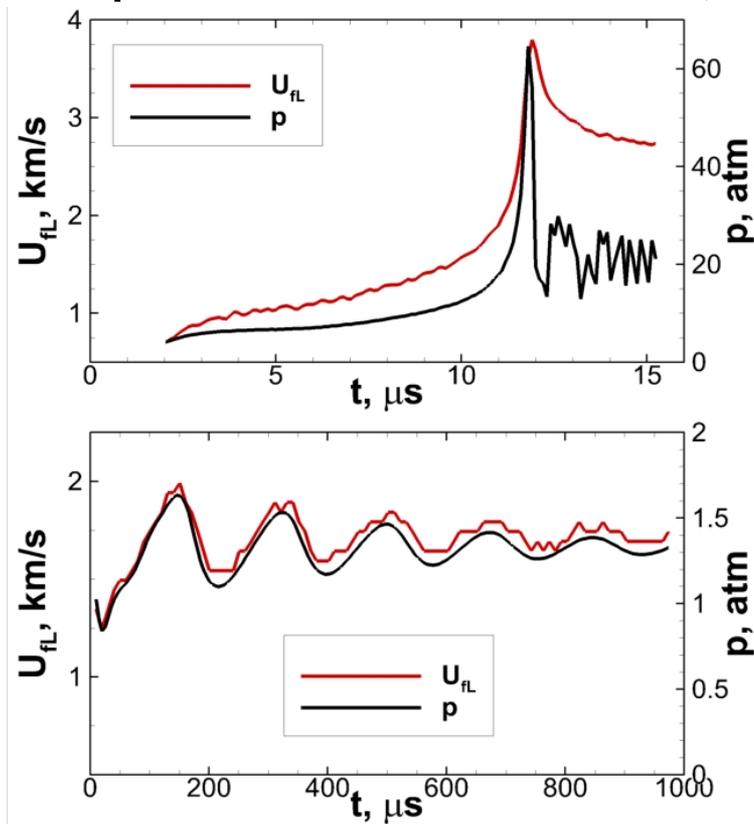
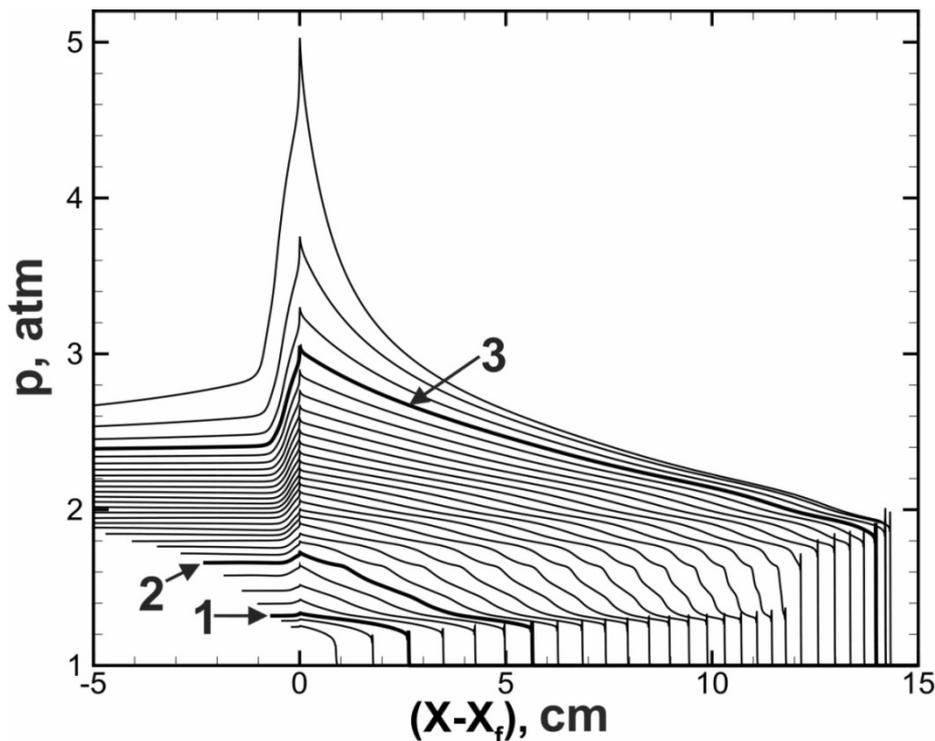
Fig. 4. Correlation between flow speed and pressure build-up inside elongated enclosures (e.g. tubes and galleries) for gas-air and dust-air mixtures. (AIChE, 1994; Eder, Gerlach, & Mayinger, 1999; Gardner, Winter, & Moore, 1986; Gmurczyk & Grosshandler, 1995; Greenwald & Wheeler, 1925; Kauffman et al. 1982; Pineau & Ronchail, 1982; Srinath et al., 1985).

Сжатие свежей смеси происходит в результате воздействия серии последовательных волн сжатия, генерируемых движущимся источником энергии (фронтом пламени), что соответствует сжатию по ударной адиабате.



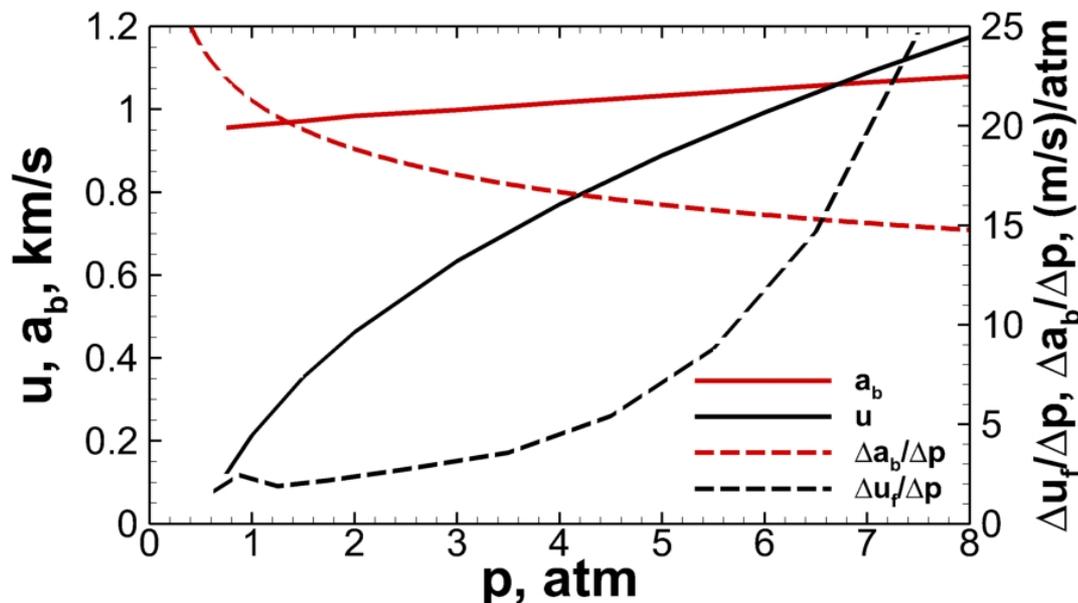
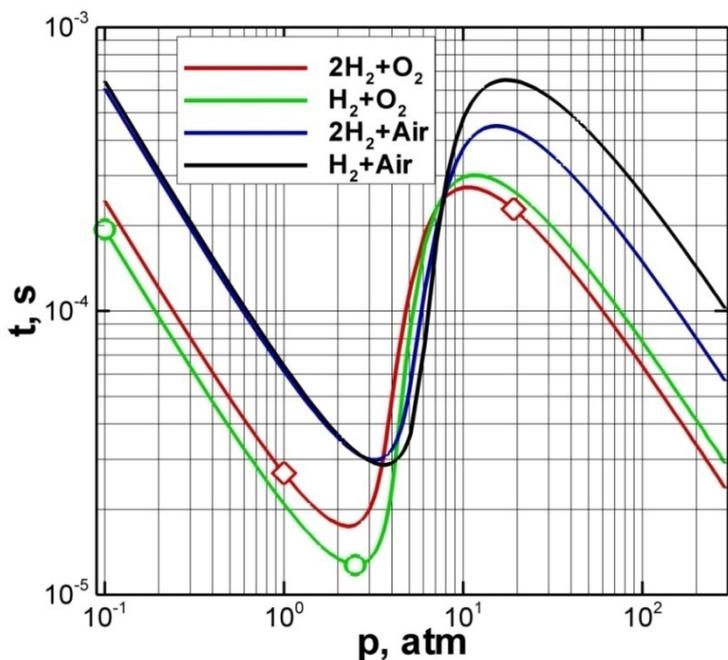
Рост скорости горения при сжатии как механизм дальнейшего ускорения пламени

По достижении скоростью фронта пламени локальной скорости звука излучаемые из зоны энерговыделения возмущения запираются сверхзвуковым потоком, что в свою очередь обеспечивает самоподдерживаемое сжатие внутри зоны реакции. В случае положительной зависимости роста скорости горения от давления становится возможным дополнительный рост скорости пламени по смеси и, как следствие, дополнительное сжатие и т.д.



Рост скорости горения при сжатии как механизм дальнейшего ускорения пламени

По мере сжатия внутри зоны реакции растет как газодинамический предел (локальная скорость звука, $a \sim \sqrt{T}$), так и скорость горения. Если второй фактор становится доминирующим, то дальнейшее ускорение определяется исключительно кинетикой процесса при дополнительном сжатием.

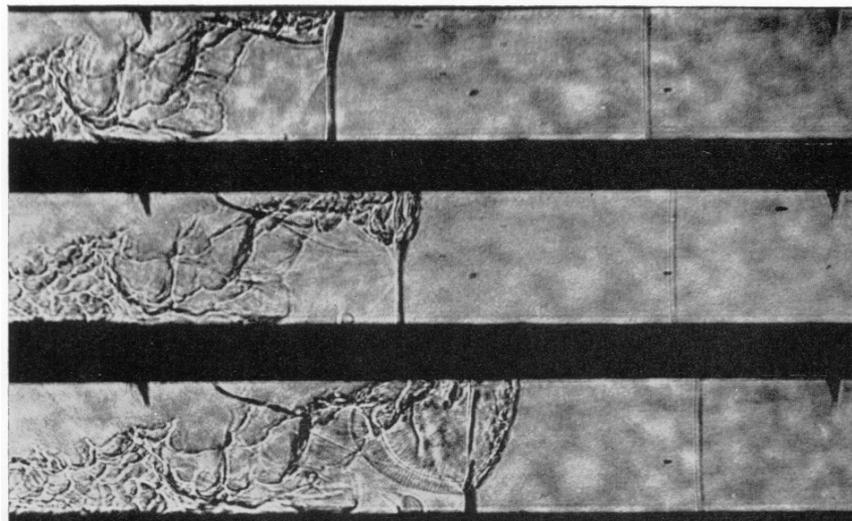
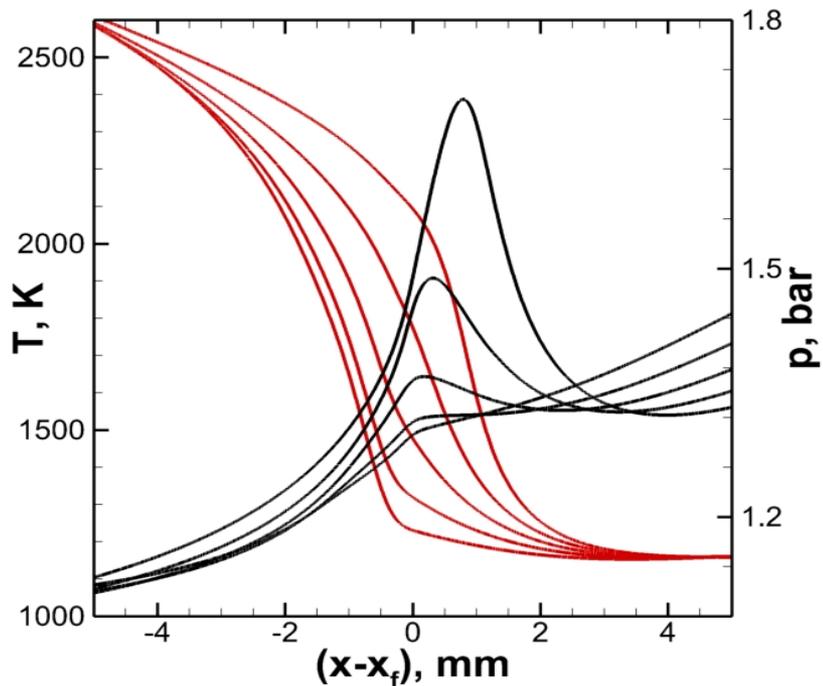


(слева) Изменение времени индукции с ростом давления.

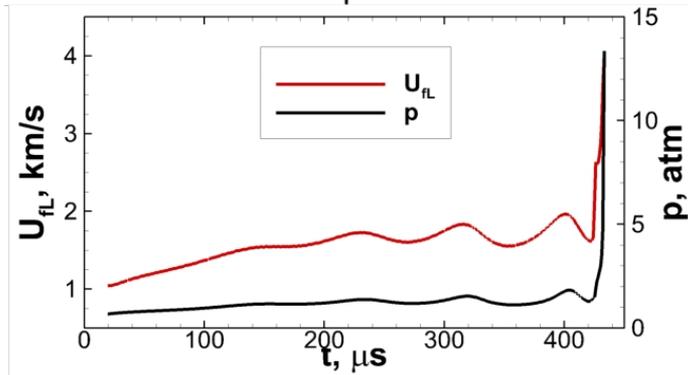
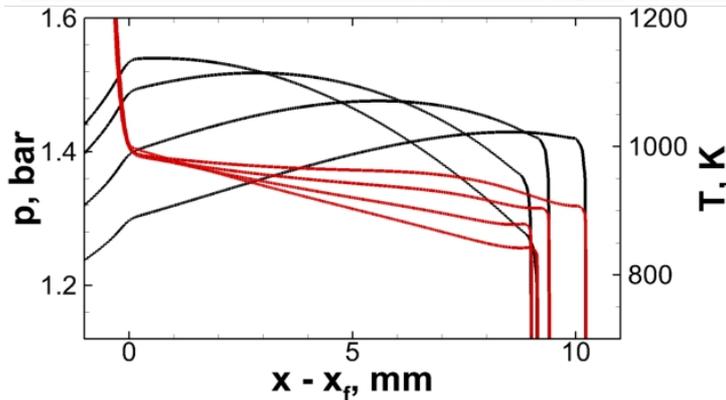
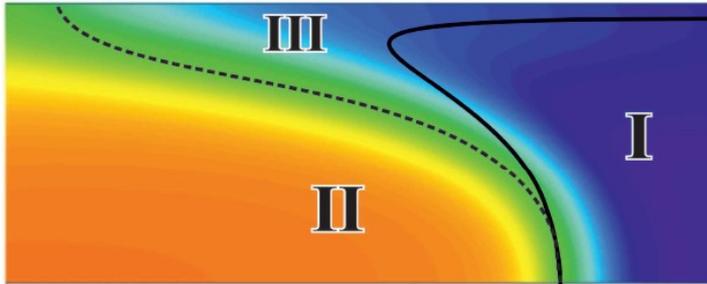
(справа) Скорости и их приращения вдоль адиабаты.

Два механизма распространения пламени по сжатой смеси

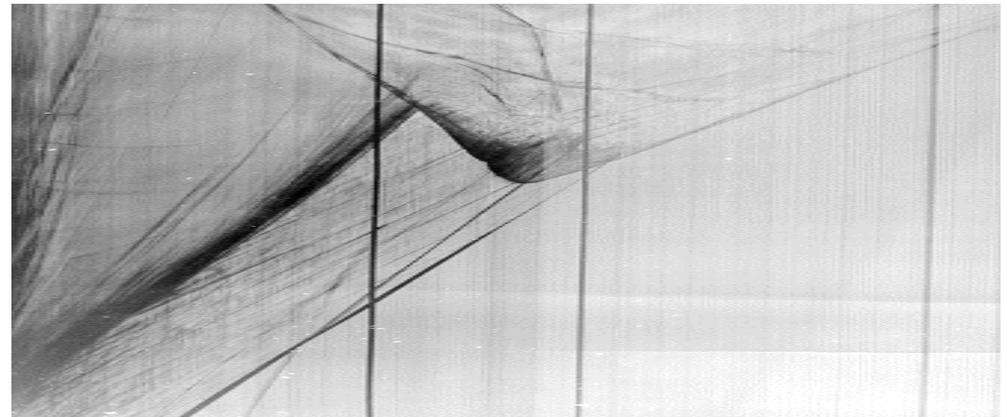
При высоких степенях сжатия (или при длительном непрерывном сжатии) рост температуры смеси может достигать предельного значения, определяющего переход от механизма с доминированием процесса обрыва цепи к механизму с доминированием процесса развития цепи. При этом экзотермические реакции начинают развиваться и оказывать влияние на скорость горения уже в предпламенной зоне. В конечном счете предпламенная область может стать очагом нового фронта горения.



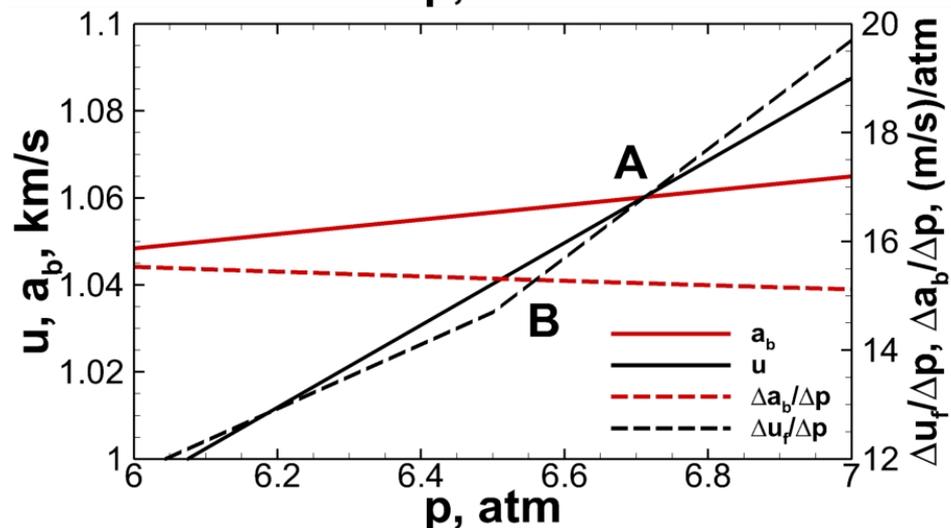
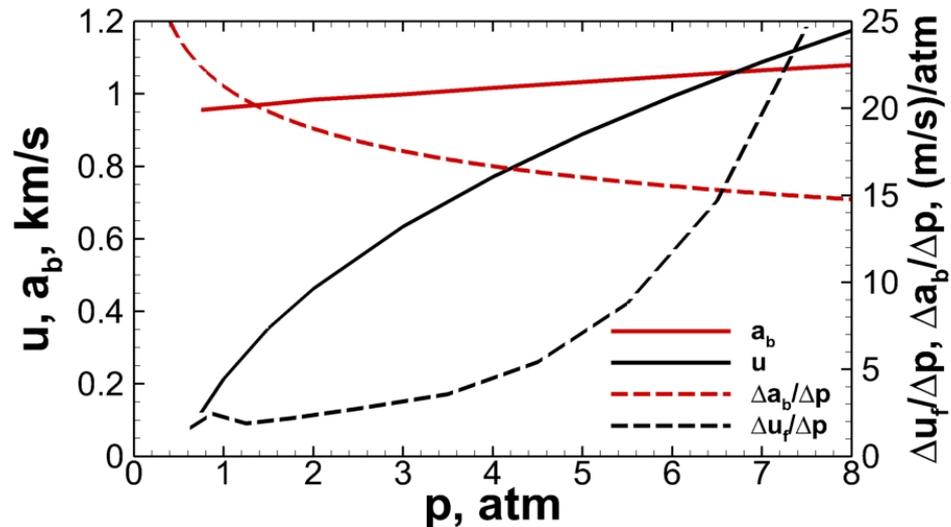
Механизм формирования «горячих точек»



При реализации квазистационарного режима распространения пламени в запертом режиме на фазе торможения отстававшие от фронта пламени волны сжатия догоняют его, возобновляя его ускорение. Нагретый газ из области III выталкивается вперед, формируя комплекс, состоящий из контактного разрыва и бегущей впереди волны сжатия. Если условия перед фронтом соответствуют области температур выше «crossover»-а, то контактные разрывы могут стать очагами новых фронтов горения.

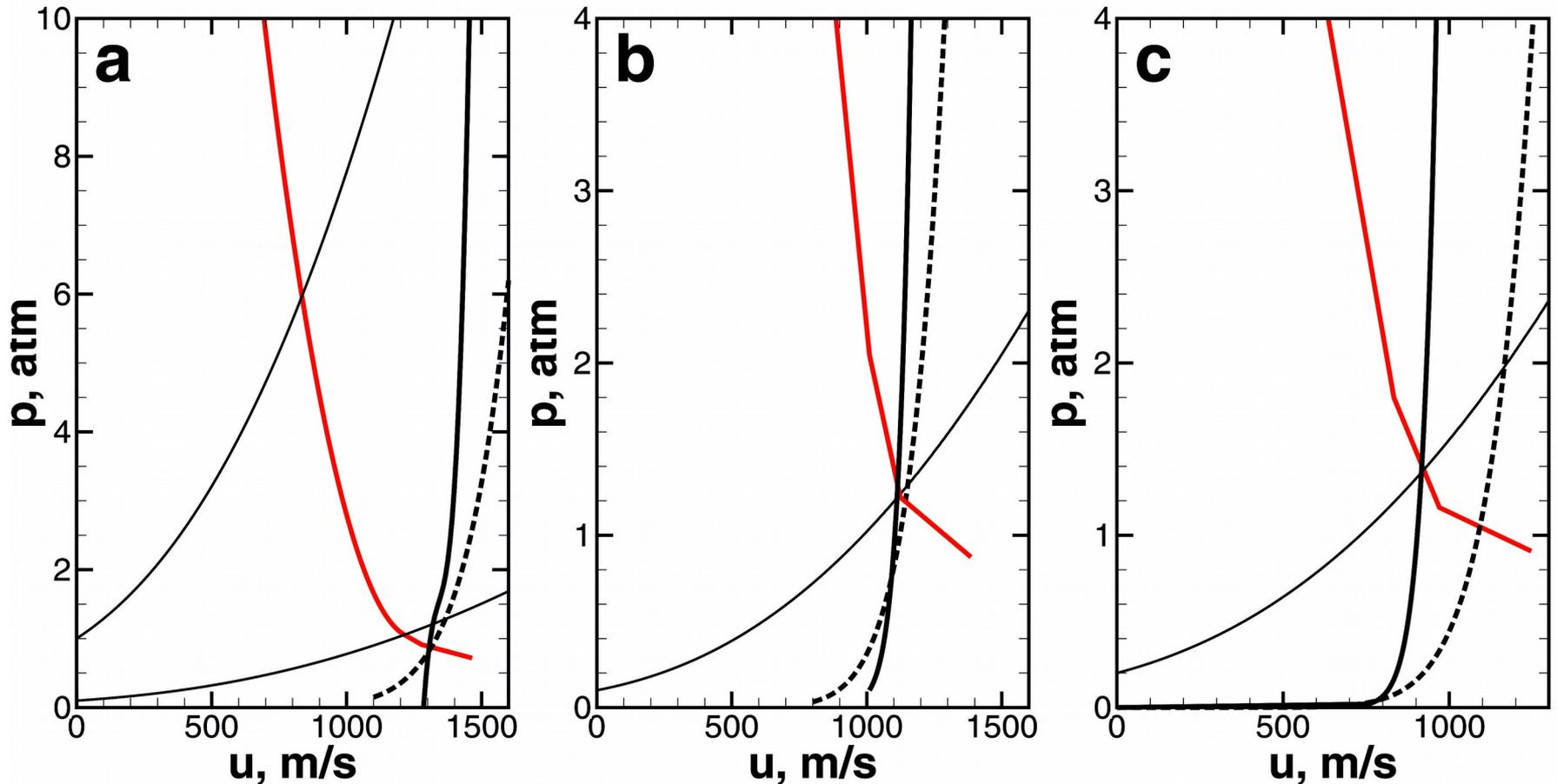


Критерии реализации различных режимов сверхзвукового горения в каналах



Если на момент достижения потоком локальной скорости звука (выполнения условия запирания потока в точке А) прирост скорости горения в режиме запертого пламени оказывается больше прироста скорости звука в продуктах горения (точка В), то ведущим механизмом дальнейшего развития пламени становится положительная обратная связь между ускорением реакции и ростом давления внутри зоны реакции. Пламя способно ускоряться дальше и есть вероятность реализации перехода к детонации. Иначе (состояние В не достигается до реализации состояния А) пламя развивается в квазистационарном режиме с околосвуковой скоростью.

Критерии реализации различных режимов сверхзвукового горения в каналах



a – $2\text{H}_2+\text{O}_2$; b – H_2+O_2 ; c – $2\text{H}_2+\text{air}$

черные – критерий А, красные – критерий В, штриховые – «кроссовер»

Заключение

- 1. Описаны основные физические механизмы, определяющие ускорение пламени в канале на различных стадиях.**
- 2. Выделены три базовых критерия, определяющих:**
 - предельно допустимую газодинамическую скорость ускоряющегося потока;**
 - возможность ускорения пламени за счет особенностей химической кинетики;**
 - переход к режиму распространения пламени по реагирующей смеси.**
- 3. На примере водородо-содержащих смесей предложена и опробована методика количественной оценки выделенных критериев, обеспечивающая на наш взгляд удовлетворительное описание доступной экспериментальной информации.**



**СПАСИБО
ЗА ВНИМАНИЕ!**