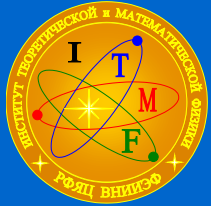


Институт Теоретической и Математической Физики



Russian Federal Nuclear Center -

Численное исследование перехода к
детонации горения водородовоздушной
смеси в опытах на установке НТСФ

О. Г. Синькова, В. П. Стаценко, Ю. В. Янилкин

Код FIRECON

Код FIRECON представляет собой пакет программ, позволяющий проводить численное моделирование различных режимов горения (от медленного горения до детонации) паро-водородо-воздушных смесей в трехмерном пространстве с целью получения оценок, максимально возможных (для данного набора исходных параметров) уровней механических нагрузок на твердые стенки объемов. Моделирование производится в декартовой системе координат на неподвижной сетке, образованной прямыми, параллельными координатным осям, как правило, на кубической сетке.

Код используется для анализа безопасности АЭС в случае тяжелой аварии на стадии выделения значительных количеств водорода.

Область допустимых значений исходных параметров:

Начальная температура: 20°C – 250°C;

Начальное давление: 0.1 – 0.4 МПа;

Концентрация водорода: 0 – 100%;

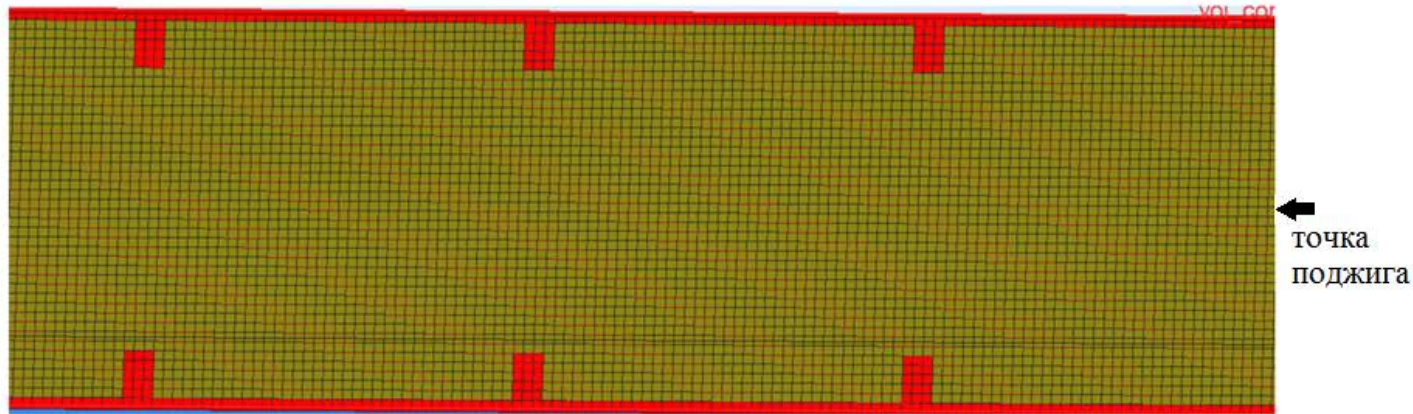
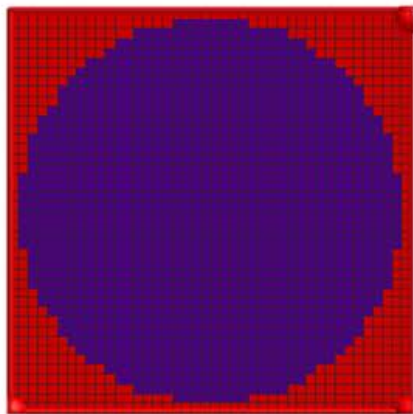
Концентрация водяного пара: 0 – 100%.

Постановка экспериментов и расчётов

Эксперименты выполнялись в Брукхейвенской лаборатории на установке НТСФ и описаны в [G. Ciccarelly et al., 1998], далее [1].

Геометрия представляет собой трубу длиной $L = 2130$ см и диаметром $D = 27.3$ см. Через каждые 27 см трубы помещаются препятствия. Препятствия представляют собой диски с отверстием внутри. Граничные условия на поверхностях – «жесткие стенки» со скольжением. $P_0 = 10^5$ Па, $T_0 = 20$ °С. Поджиг осуществлялся заданием температуры $T_{i0} = 1072$ °С в одной ячейке в середине торца начального участка трубы.

Моделирование проводилось в 3D постановке.



Вид счётной сетки в поперечном сечении к оси между препятствиями (слева) и фрагмента в продольном сечении (справа)

Варианты расчетов

Сетка варьировалась N, 2N, 4N, в расчете N размер ячейки $h = 0.325$.

Номер варианта	Номер опыта [2]	β_{H_2}	сетка
1	K132	0.1	2N
2	K15	0.1272	2N
3	K21	0.158	4N
4	K21	0.158	N
5	K21	0.158	2N
6	K11	0.1739	2N
7	K9	0.2504	2N

Расчеты выполнены для различных значений объемной доли водорода в соответствии с опытами [1].

Далее если не указаны единицы величин, подразумевается система СИ: м, кг, с.

Некоторые теоретические соотношения

$$D = \left\{ \frac{\gamma_2 - 1}{2} \cdot [(\gamma_2 + 1) \cdot q_{eff} + (\gamma_2 + \gamma_1) \cdot c_{v1} \cdot T_1] \right\}^{1/2} +$$

$$+ \left\{ \frac{\gamma_2 + 1}{2} \cdot [(\gamma_2 - 1) \cdot q_{eff} + (\gamma_2 - \gamma_1) \cdot c_{v1} \cdot T_1] \right\}^{1/2}$$

согласно [2]
[Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.
Гидродинамика. М. «Наука», 1986]

$$c_{v1} = \frac{P_1}{\rho_1 \cdot T_1 \cdot (\gamma_1 - 1)} = \frac{R}{\tilde{\mu}_1 \cdot (\gamma_1 - 1)} \quad \tilde{\mu}_1 = 10^{-3} \cdot [(1 - \beta) \cdot \mu_{air} + \beta \cdot \mu_{H_2}] \quad \gamma_{air} = 1.4$$

$$\frac{1}{\gamma_2 - 1} = \sum \frac{\beta_i}{\gamma_i - 1}$$

Исходим из реакции $2H_2 + O_2 = 2H_2O$

$$\beta_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_0 - n_{H_2O}} = \frac{\beta}{1 - \beta} \quad \beta_{air} = 1 - \frac{\beta}{1 - \beta} = \frac{1 - 2\beta}{1 - \beta} \quad \gamma_2 = \frac{3.5}{2.5 + \beta}$$

$$q_{eff} = q \frac{M_{st}}{M_{\Sigma}}$$

Масса стехиометрической смеси водорода и кислорода
Полная масса смеси

q - удельная теплота

Некоторые теоретические соотношения

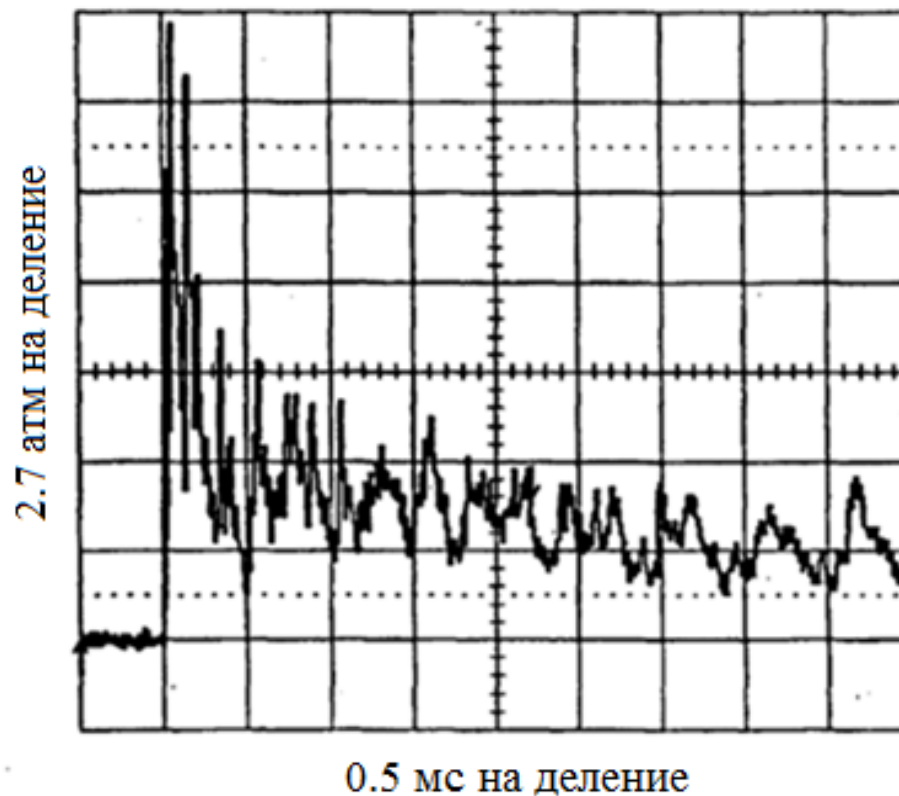
Давление за фронтом детонационной волны в точке Чепмена-Жуге (CJ) [2]:

$$P_{CJ} = \frac{D^2 + (\gamma_1 - 1) \cdot c_{v1} \cdot T_1}{(\gamma_2 + 1) \cdot (\gamma_1 - 1) \cdot c_{v1} \cdot T_1}$$

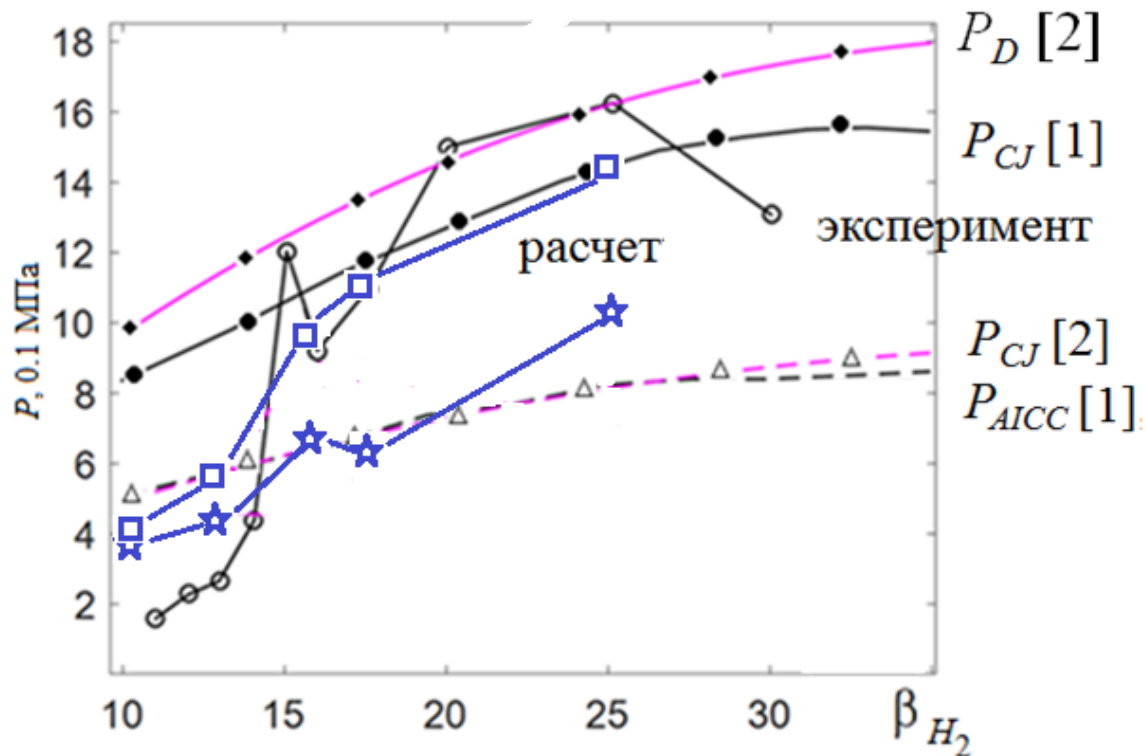
Однако, согласно [2], непосредственно за УВ, являющейся передним фронтом сильной детонационной волны, соответствующей точке Чепмена-Жуге, имеется ещё несгоревшая газовая смесь, и её состояние отличается от состояния в точке Чепмена-Жуге. Давление в ней дается выражением

$$P_{sw} = \frac{2D^2 \cdot \rho_1 - (\gamma_1 - 1) \cdot P_1}{\gamma_1 + 1}$$

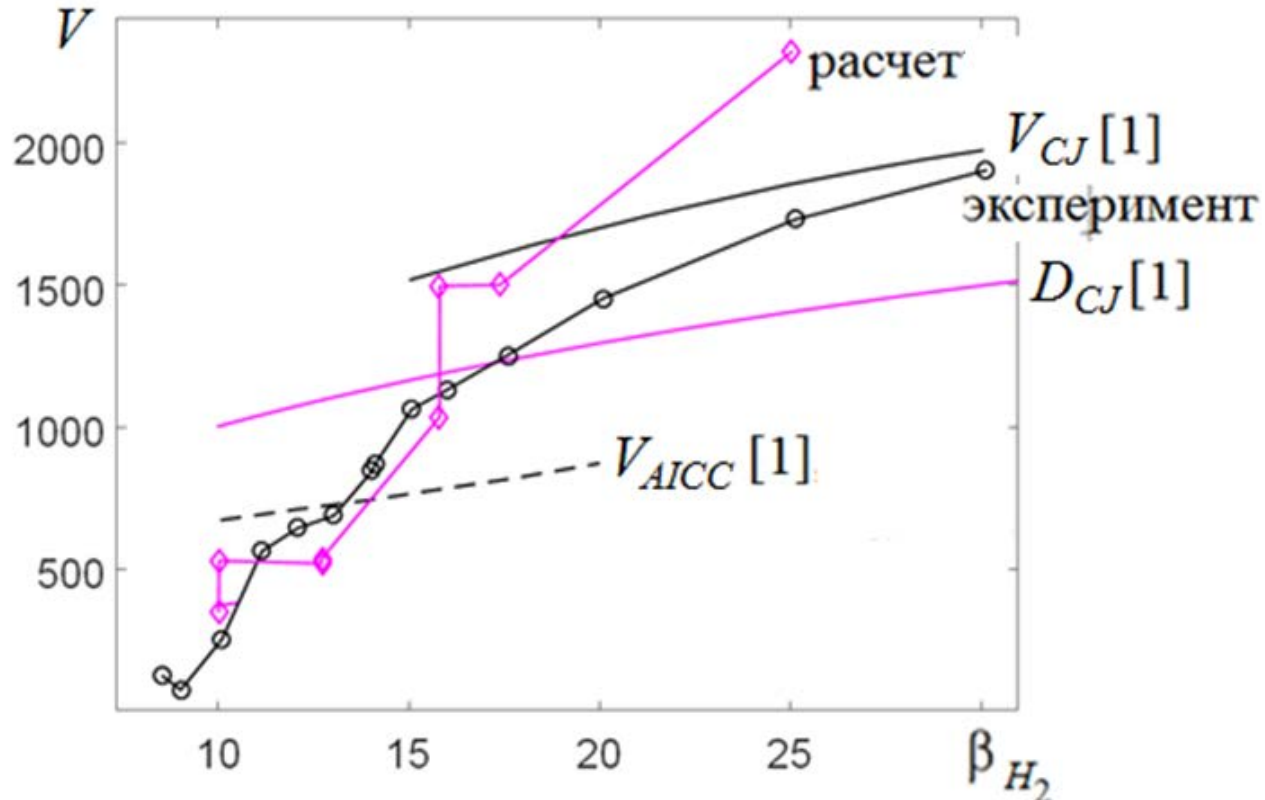
Типичная зависимость давления от времени в экспериментах в режиме детонации



Зависимости от мольной доли водорода давления за фронтом ударной и детонационной волн



Зависимости от мольной доли водорода скорости детонационной волны

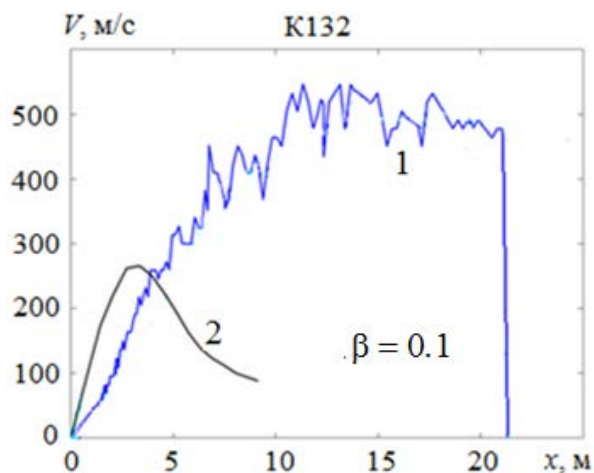


Максимальные величины скорости и давления, полученные на стадии установления в опытах и расчетах

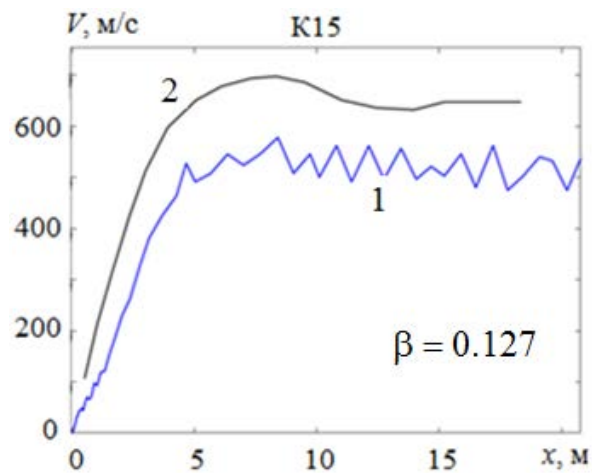
Номера опытов	Водород (%)	Скорость (м/сек)		Давление (атм)		Режим горения	
		Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт	Опыт	Расчёт
9	25.04	1730	2320	16.3	17.9	детонация	детонация
11	17.39	1248	1500	10.9	11.6	детонация	детонация
21	15.8	1116	1380	12	9.67	детонация	детонация
15	12.72	683	539	2.7	5.3	choking	choking
132	10.02	254	260-530		3.1-4.35	дефлаграция	choking

Результаты рассчитанных нами и измеренных в [1] скорости и давления

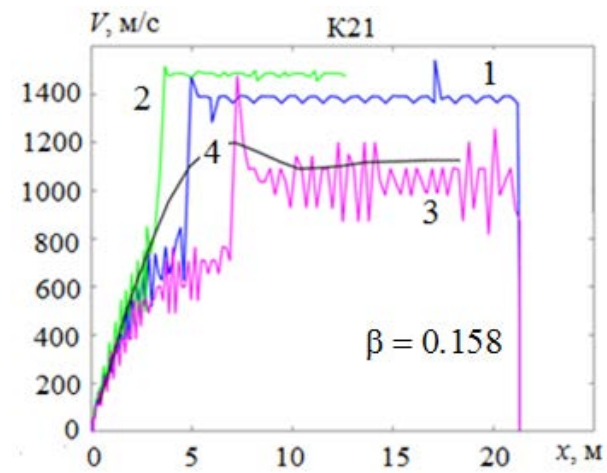
Расчетные зависимости от продольной координаты скорости фронта пламени



1 – расчет 2N, 2 - опыт

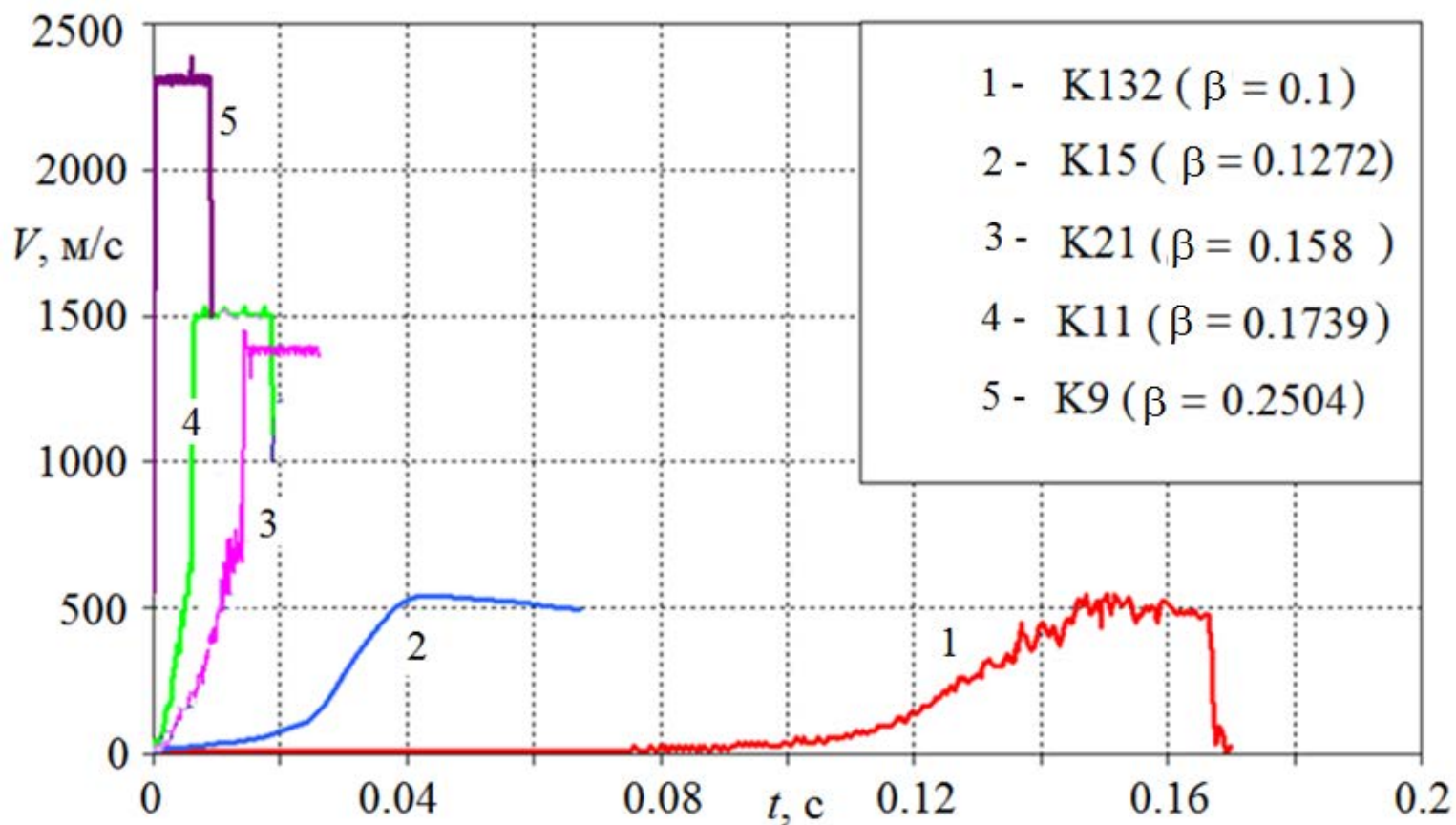


1 – расчет 2N, 2 – опыт

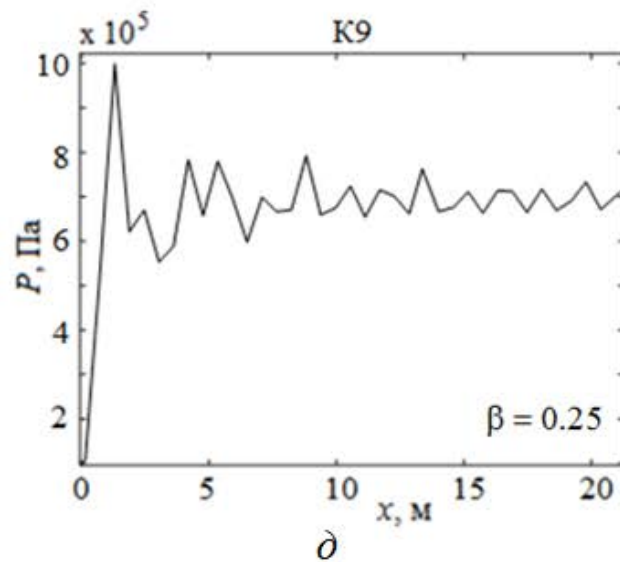
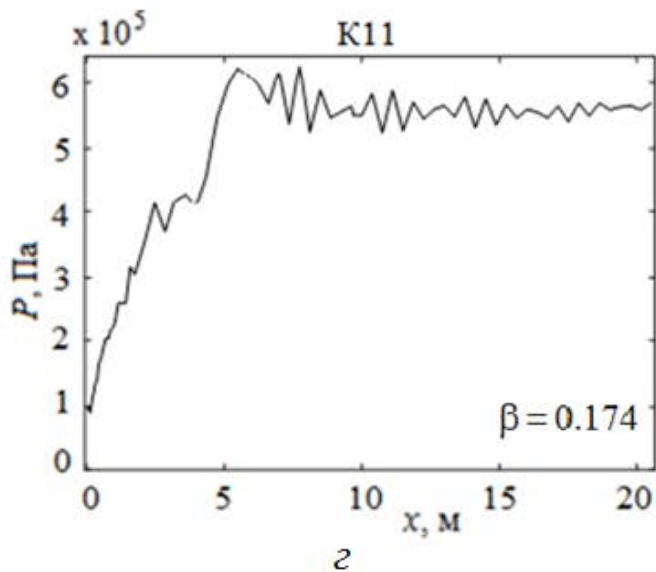
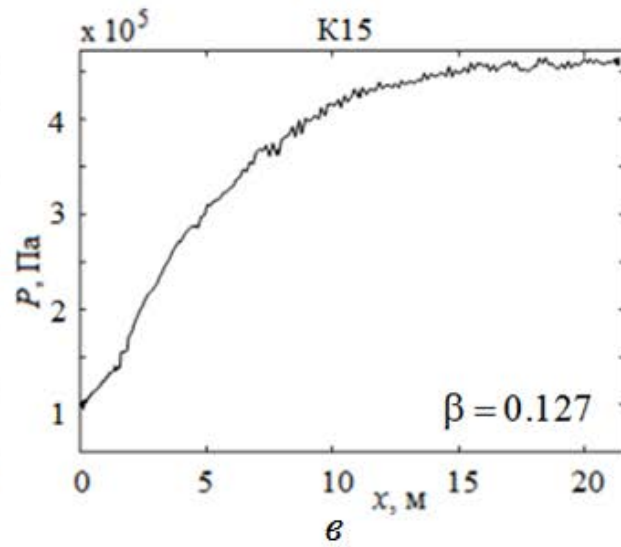
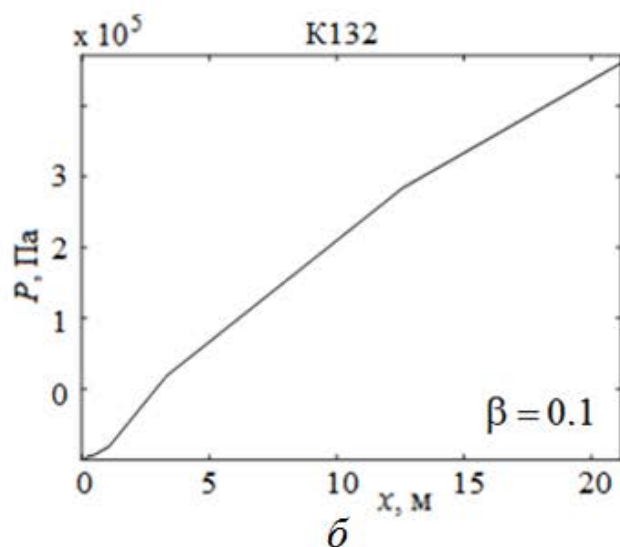
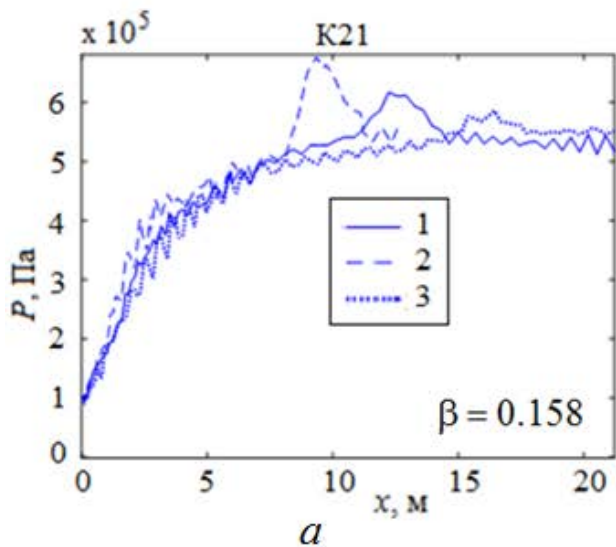


1 - сетка 2N; 2 – сетка 4N;
3 - сетка N, 4 – опыт

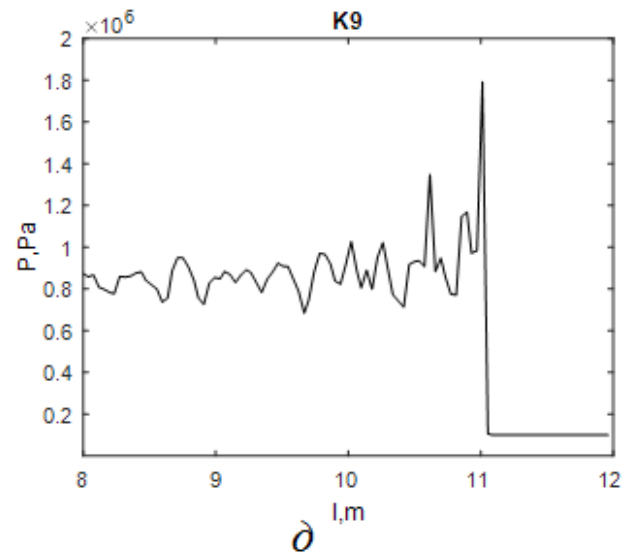
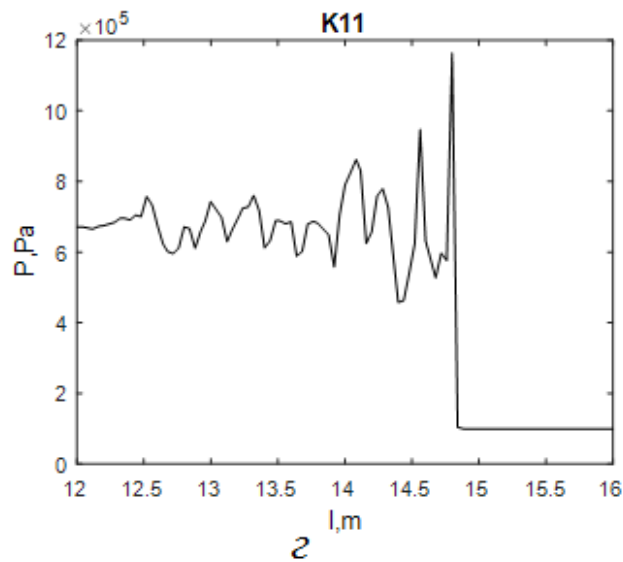
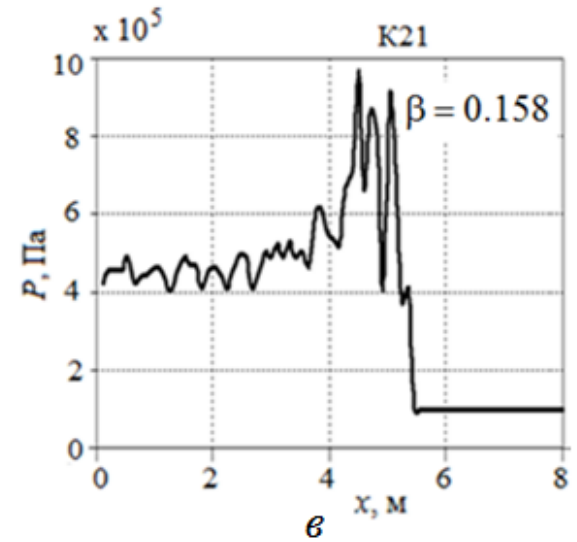
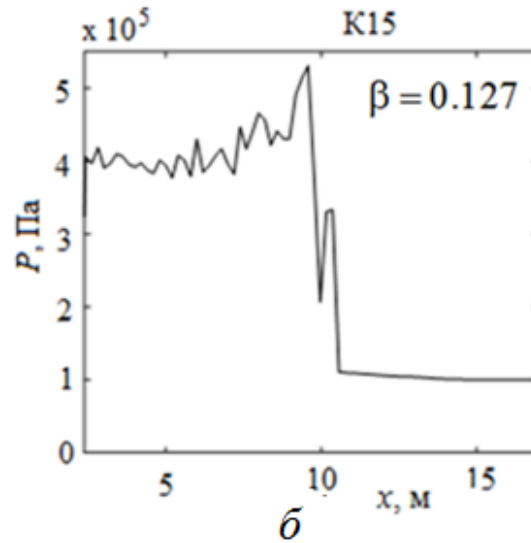
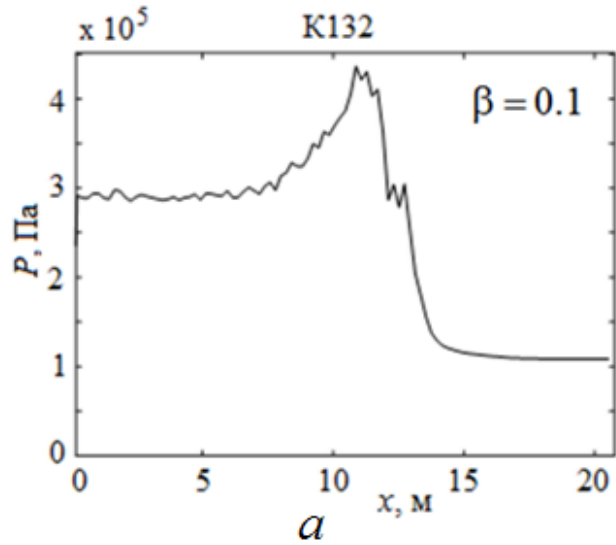
Зависимости скорости фронта пламени от времени



Зависимости фронта пламени максимального давления от координаты

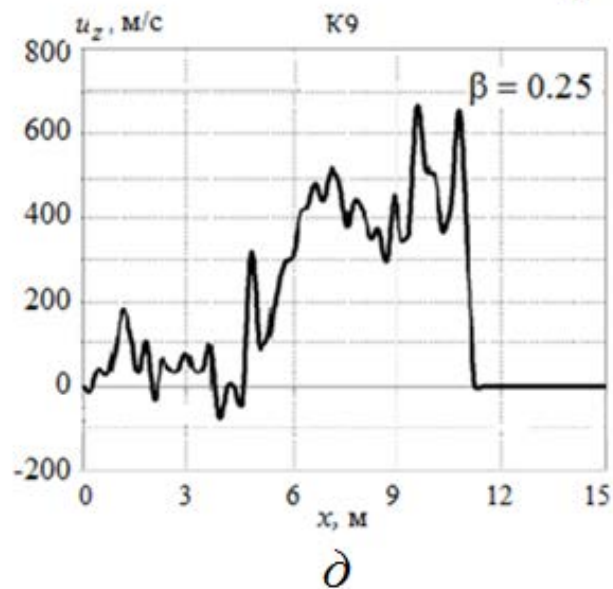
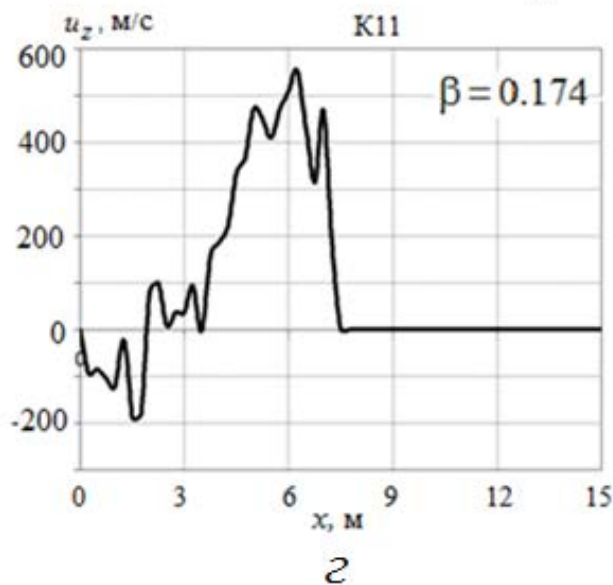
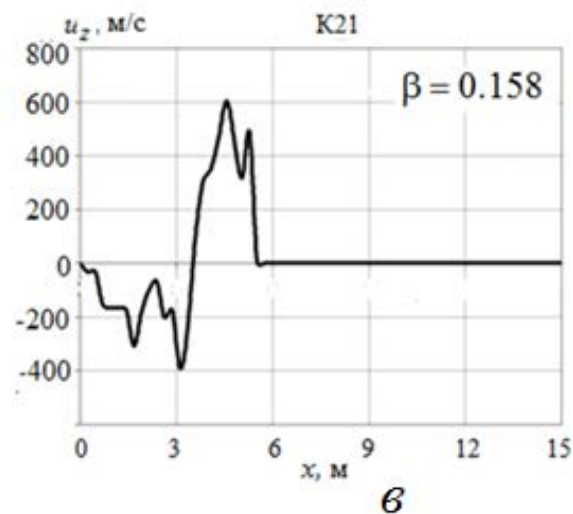
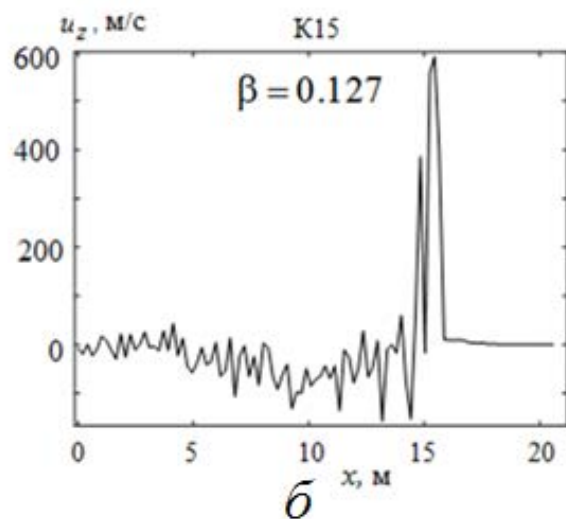
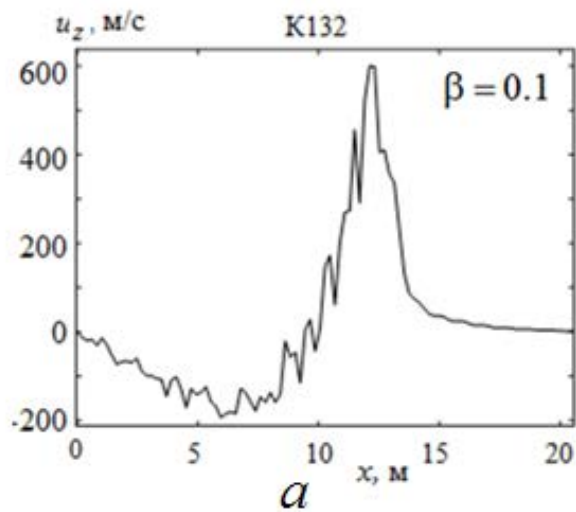


Профили давления



а) опыт K132 на момент $t=0.15$ сек; б) опыт K15 на момент $t=0.05$ сек;
в) опыт K21 на момент $t=0.015$ сек; з) опыт K11 на момент $t=0.01$ сек;
д) опыт K9 на момент $t=0.005$ сек;

Профили продольной компоненты скорости



a - опыт K132 на $t=0.15$ с; b - опыт K15 на $t=0.06$ с;
 v - опыта K21 на $t=0.015$ с; z - опыт K11 на $t=0.01$ с; d - опыт K9 на $t=0.005$ с;

Размеры детонационной ячейки

В расчетах выдавались размеры детонационной ячейки. В задаче с $\beta = 0.1$ и $\beta = 0.127$ имеется только режим медленного горения. В этом режиме не только $\sigma > \sigma_{er}$, этому соответствует также значение отношения внутреннего диаметра препятствия d к размеру детонационной ячейки λ_d , меньшее критического: $d / \lambda_d < 3.75$.

В задачах с большими концентрациями водорода вначале имеется только первый режим, но затем превышает критическое значение величины d / λ_d (от 8.7 до 66) и течение выходит на детонационный режим. Но точно так же ведёт себя скорость горения как функция времени: она скачком возрастает при $t \gtrsim 0.6$ и далее остаётся приблизительно постоянной. Таков же характер поведения рассмотренных величин в других вариантах, в которых достигается режим детонации (с $\beta = 0.158$ и $\beta = 0.2504$).

В работе [1] получен критерий $d / \lambda_d \gtrsim 1$ для перехода от горения к детонации, это согласуется с результатами, приведёнными в книге [3] (для поддержания уже созданного детонационного режима, согласно [3], требуется менее жёсткий критерий $d / \lambda_d \gtrsim 1 / \pi$), что не противоречит нашим результатам.

[3] John H. S. Lee. The Detonation phenomenon. Cambridge University Press, New York, 2008.

Заключение

Результаты расчётов для опыта с $\beta = 12.7\%$ соответствуют, как и измерения, запертому (choking) режиму. Расчёт для опыта с $\beta = 10\%$ также соответствует запертому режиму, в то время как измерения дают меньшие значения давления и скорости, соответствующие дефлаграции. Это может быть связано с дополнительными факторами в экспериментах (излучение, влияние пограничного слоя, подавляющими горение), как вследствие подавления турбулентности, так и из-за уменьшения энергии за фронтом УВ. В наших расчётах эти факторы не учитывались, поэтому естественно ожидать завышения параметров горения для малых содержаний водорода в смеси.

В опытах с $\beta > 15\%$ все результаты расчётов, как и измерения, соответствуют режиму детонации. Рассчитанные профили давления и скорости в установившихся режимах горения указывают на наличие УВ перед фронтом детонационной волны. Характеристики УВ и ДВ находятся в согласии с известными теоретическими результатами [2].

Спасибо за внимание!