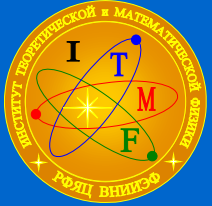


Институт Теоретической и Математической Физики



Russian Federal Nuclear Center -

VNIIEF

Прямое численное моделирование
распространения ударной волны по
гетерогенной смеси двух газов

Ю.В.Янилкин, Л.Г.Королева

Введение

Численное моделирование гетерогенных смесей – актуальная задача и численные методы должны уметь ее моделировать, прежде всего, движение УВ.

Первый подход основан на осредненном описании ее термодинамических параметров, таких как плотность и энергия с единым УРС для смеси.

Второй подход (более общий) основан на полном термодинамическом выделении компонентов смеси со своими УРС. В этом случае необходимы модели замыкания уравнений газодинамики в смешанных ячейках.

В любом случае для единого УРС или моделей замыкания необходимы какие-либо данные для их верификации. Здесь 3 пути.

1. Экспериментальные данные, однако по ним информация очень скудная и ограниченная.
2. Теоретические исследования, которые проводятся при определенных предположениях и упрощениях задачи.
3. Прямое численное моделирование в представлении среды в виде некоторых структур.

Литература

1. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композитных материалов. М.: Наука, 1984.
2. Дремин А.Н., Карпухин И.А. Метод определения ударных адиабат для дисперсных веществ. ПМТФ, 1960, №3.
3. Николаевский В.Н. Гидродинамический анализ ударных адиабат гетерогенных смесей веществ. ПМТФ, 1969, №3.
4. Ю.Ф.Алексеев, Л.В.Альтшулер, В.П.Крупникова. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей. ПМТФ, 1971, №4.
5. С.А.Кинеловский, К.К.Маевский. Модель поведения смеси с различными свойствами компонентов при высоких динамических нагрузках. ПМТФ, 2013, т. 54, №4.

Задача о распространении сильной УВ по гетерогенной смеси двух газов

Задача предложена в работе [6], аналитическое решение получено в [7]. В [8] проведено 1D численное исследование в лагранжевых переменных в предположении слоистой периодической структуры среды.

В данной работе проведено численное исследование задачи не только в предположении слоистой структуры, но и других более реальных структур. Моделирование проведено как в 1D (для сравнения с данными работы [8]), так и в 2D и 3D приближениях (в зависимости от взятых для моделирования структур) по методике ЭГАК [9] в эйлеровых переменных на неподвижной сетке.

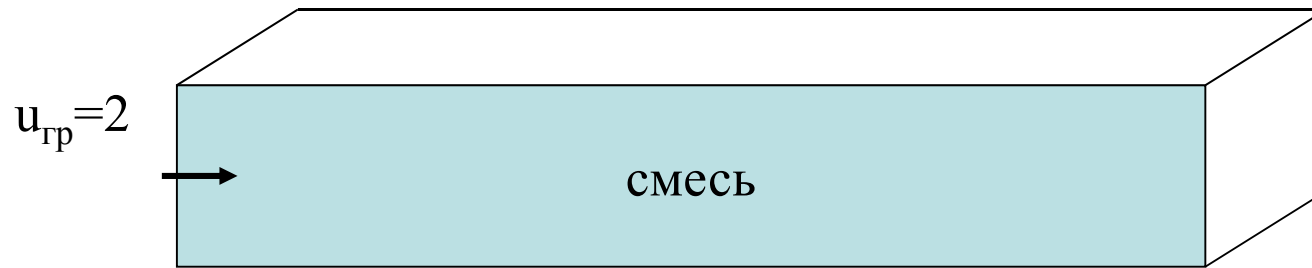
6. Бондаренко Ю.А., Янилкин Ю.В. // ВАНТ, сер. ММФП, 2000.

7. Гончаров Е.А., Янилкин Ю.В. // ВАНТ, сер. ММФП, 2004.

8. Бондаренко Ю.А., Софронов В.Н. Труды XV международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», 2015.

9. Ю.В.Янилкин, С.П.Беляев и др. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание, Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, вып. 12, 2008.

Постановка задачи



В области содержится гетерогенная смесь двух газов с УРС $P = (\gamma - 1)\rho e$

Начальные данные газов ($t=0$)

Номер газа	ρ_0	e_0	u_0	P_0	γ	β_0
1	1	0	0	0	3.0	0.5
2	1	0	0	0	1.2	0.5

Аналитическое решение получено в предположении, что на УВ компоненты нагружаются однократно и имеют одинаковое давление.

$$\rho_i = \frac{\gamma_i + 1}{\gamma_i - 1} \rho_{i0}, \quad D = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} u, \quad u^2 = P \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right), \quad e = \frac{1}{2} P \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)$$

$$P_i = P, \quad e_i = \frac{P}{(\gamma_i - 1)\rho_i}$$

Постановка и обработка эйлеровых расчетов

Расчеты проводились на сетках N , $2N$, $4N$, где N во всех постановках означает сетку с линейным размером ячейки $h=0.002$.

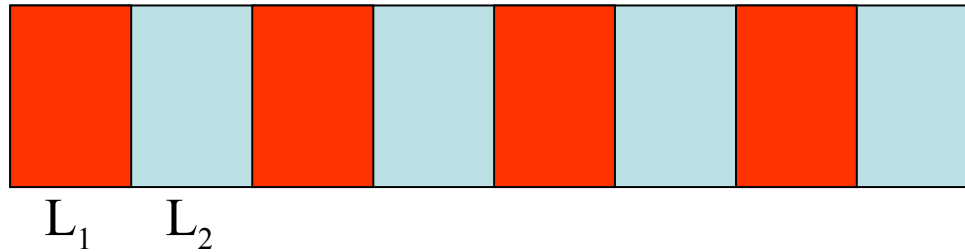
Граничное условие - втекающий поток первого газа, с параметрами за фронтом УВ из аналитического решения ($\rho=2$, $e=1.419$, $u=2$).

В качестве основного результата далее приводятся скорости фронта УВ $D_{\text{фр}}(t)$, которая на момент времени t_k вычисляется по формуле

$$D_{\text{фр}}(t_k) = \frac{dX_{\text{фр}}}{dt} \approx \frac{X_{\text{фр}}(t_k) - X_{\text{фр}}(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}$$

В многомерном случае данные получают предварительным усреднением величин в поперечном сечении.

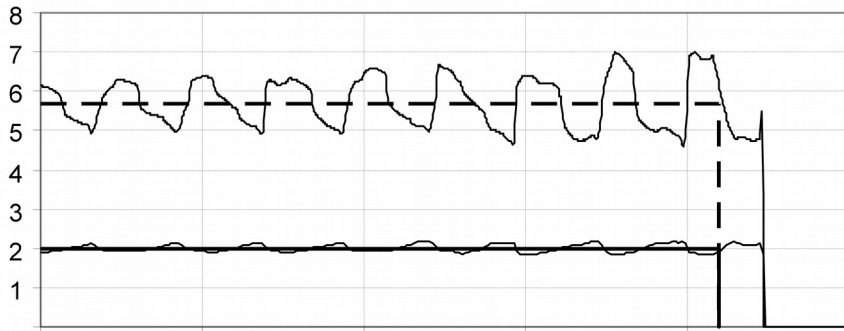
Постановка 1D расчётов



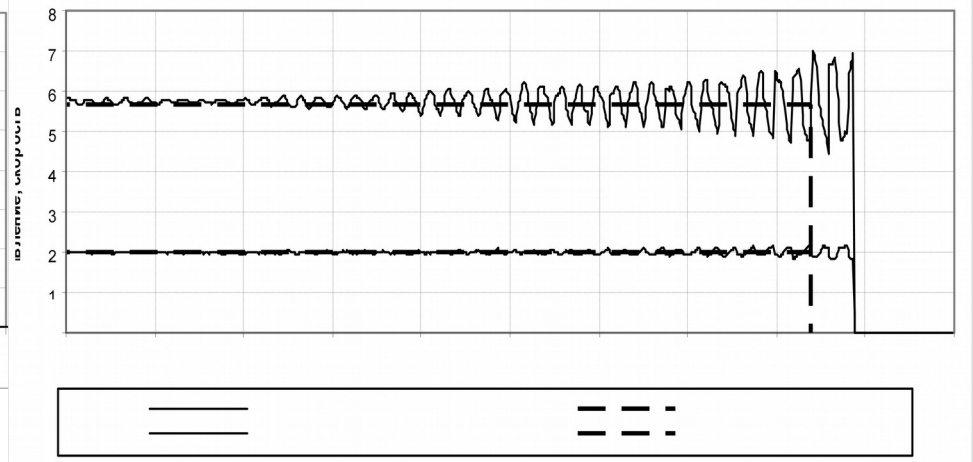
Компоненты смеси представлены в виде чередующихся 300 слоев одинаковой толщины $L_1=L_2=0.05$, расположенных вдоль движения УВ.

Результаты 1D расчётов

$t=1$

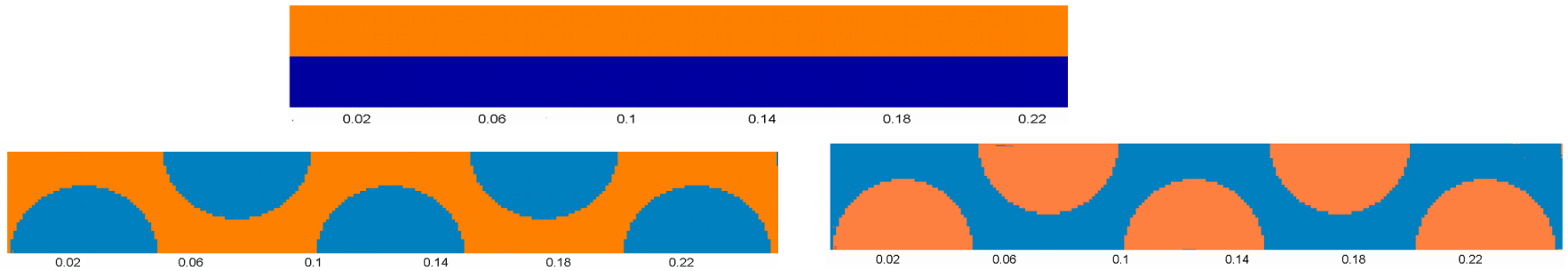


$t=5$

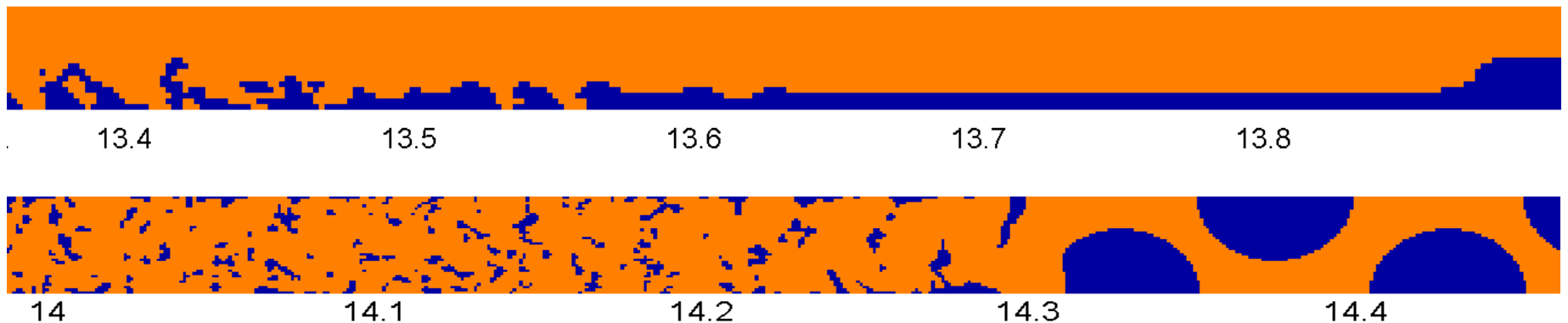


Профили давления и скорости

Постановка 2D расчётов (плоская геометрия)

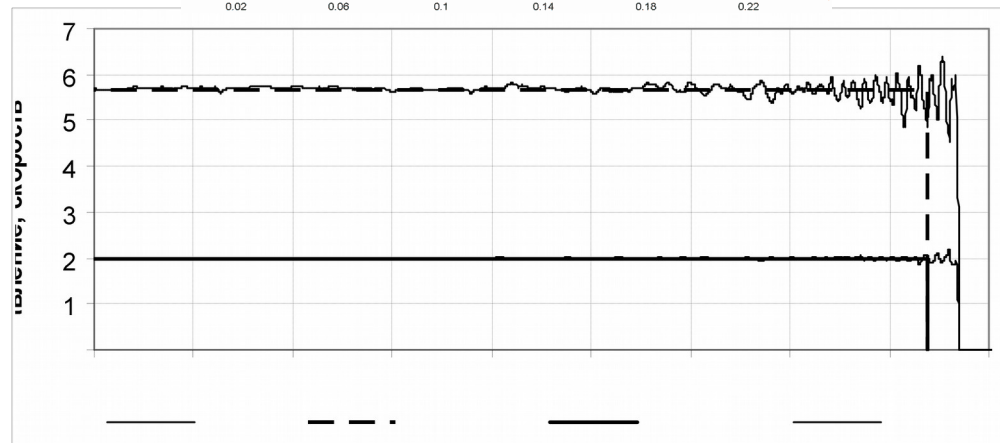
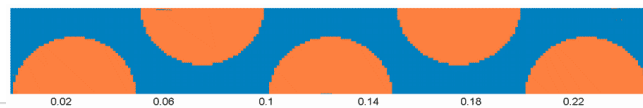
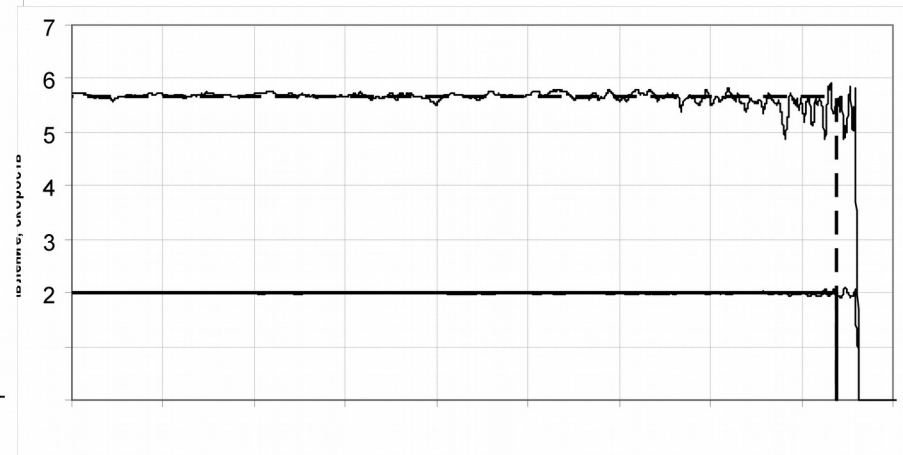
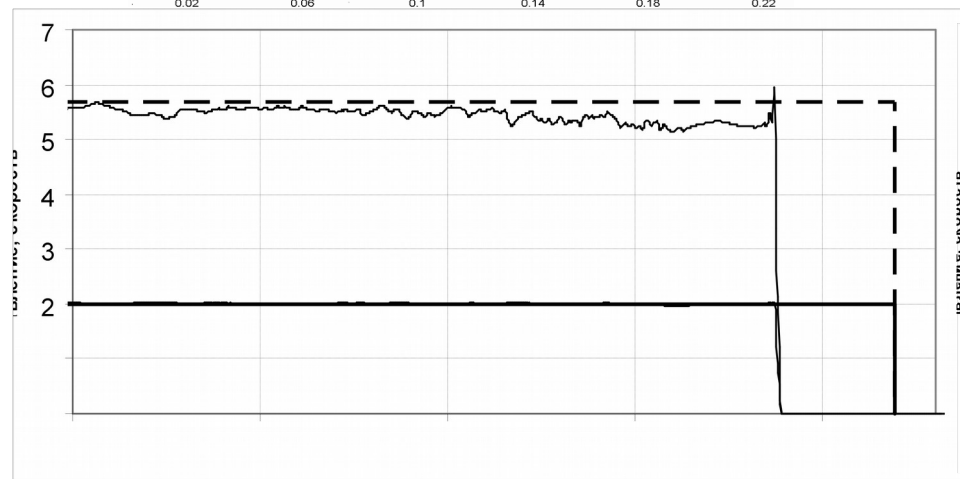
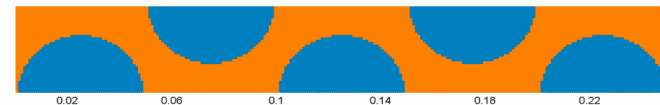
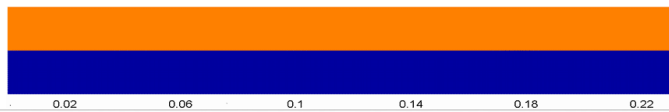


Результаты 2D расчётов



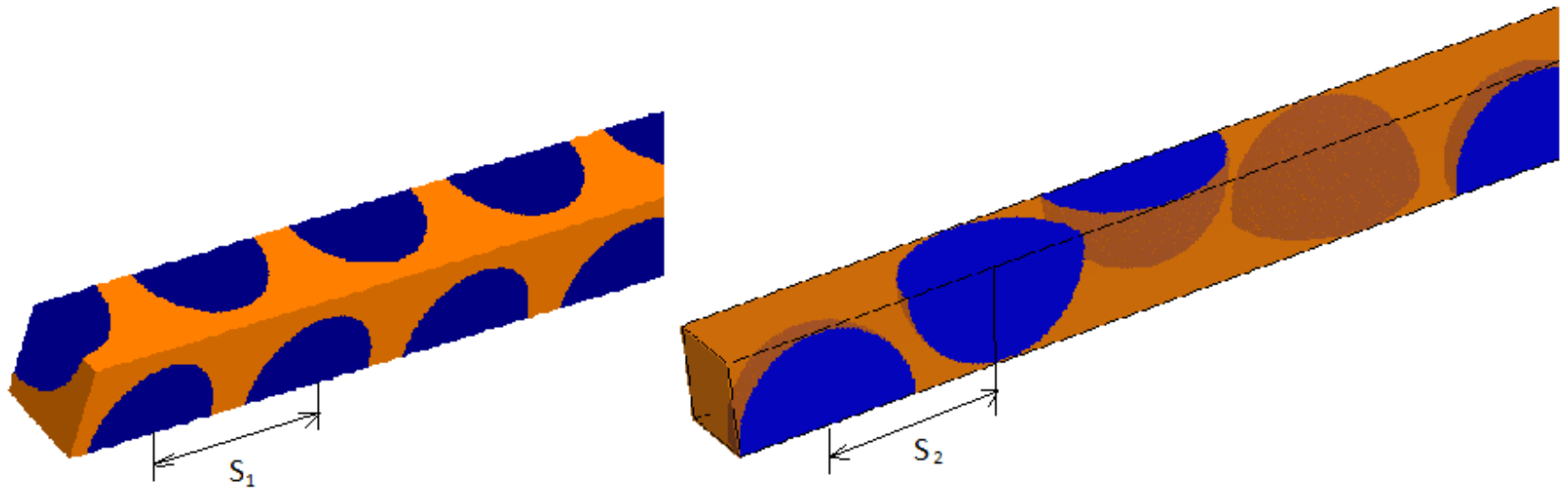
Картины течения на $t=5$

Результаты 2D расчётов

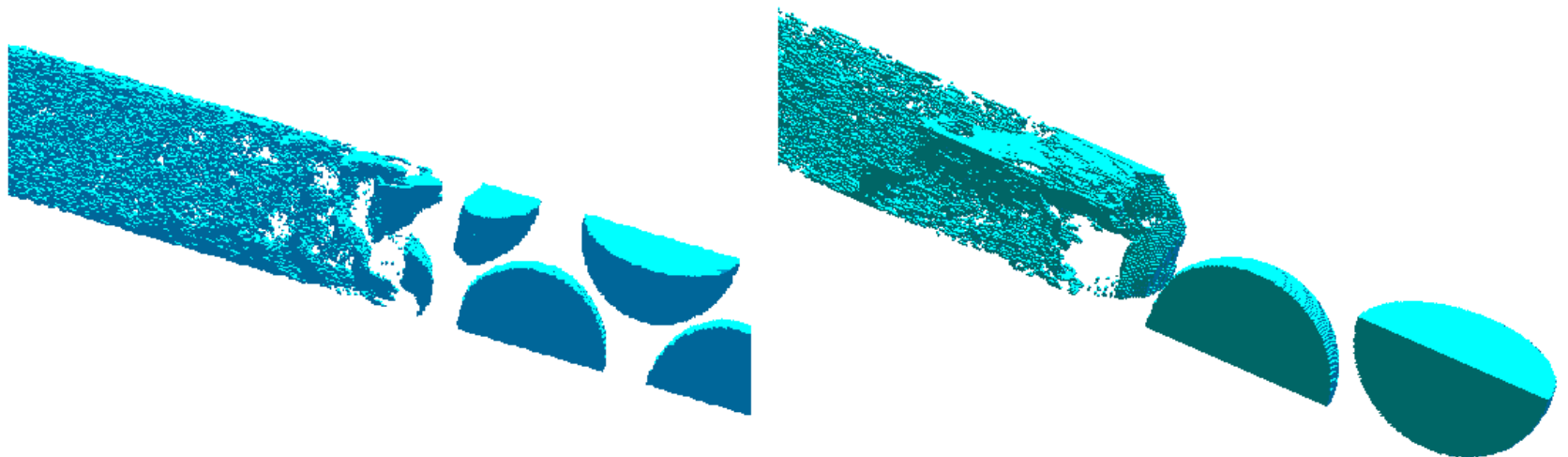


Профили давления и скорости на $t=5$

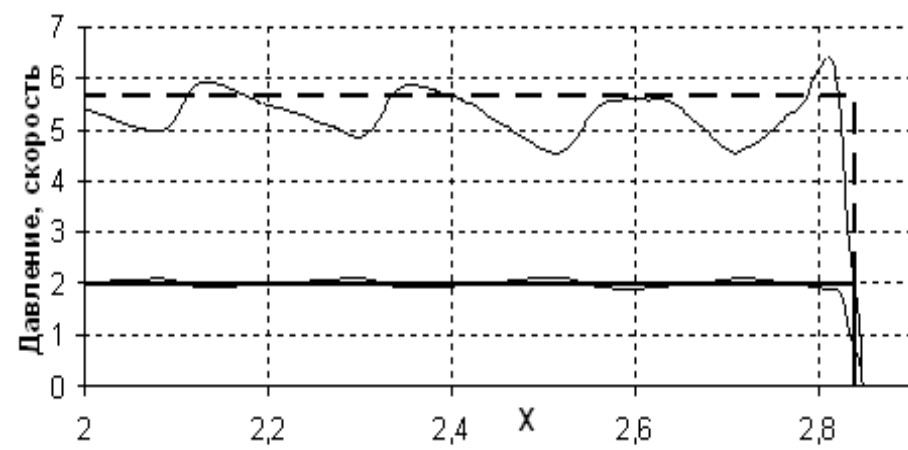
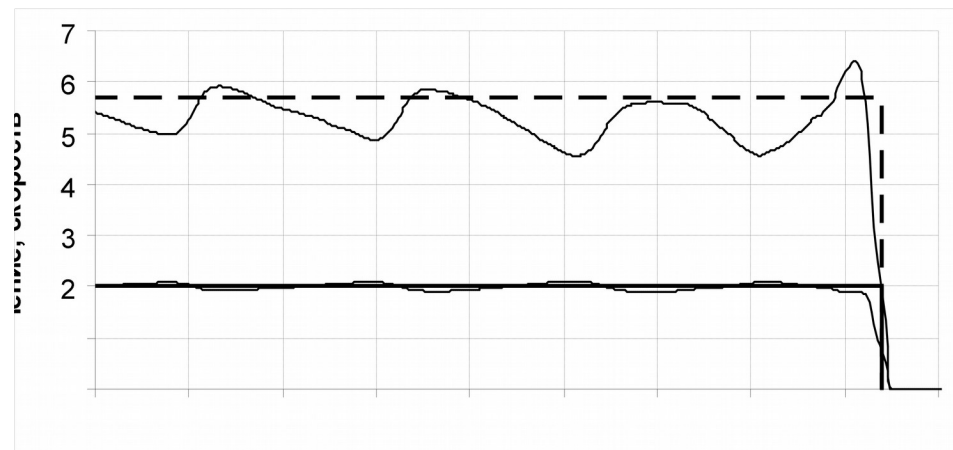
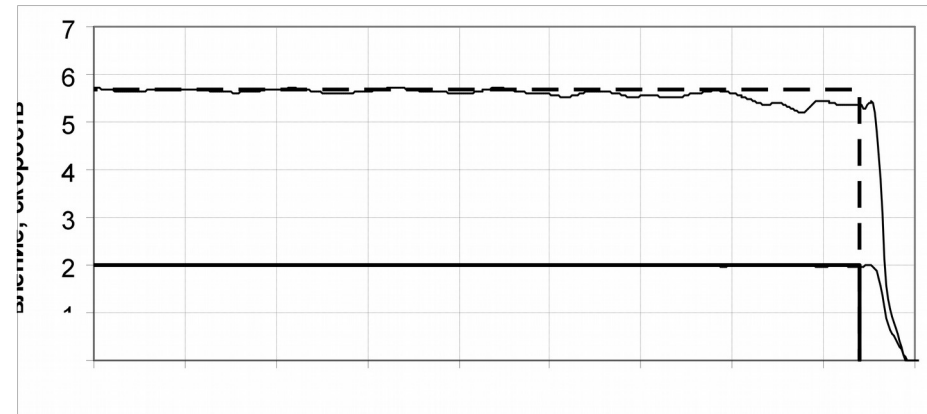
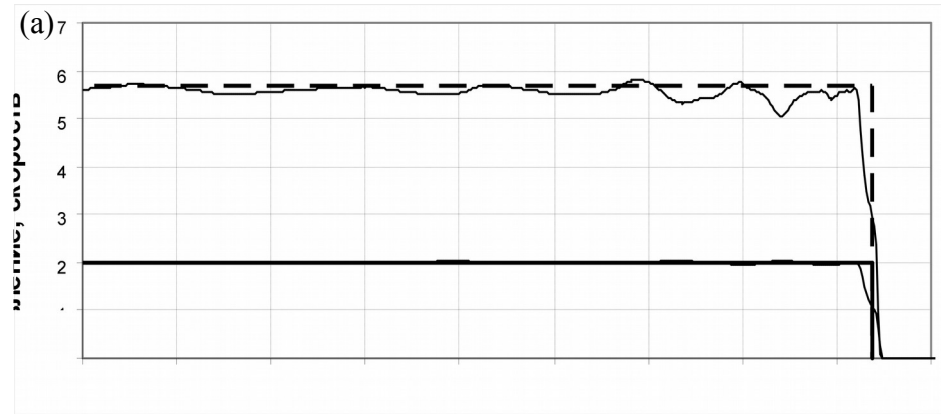
Постановка 3D расчётов



Результаты 3D расчётов

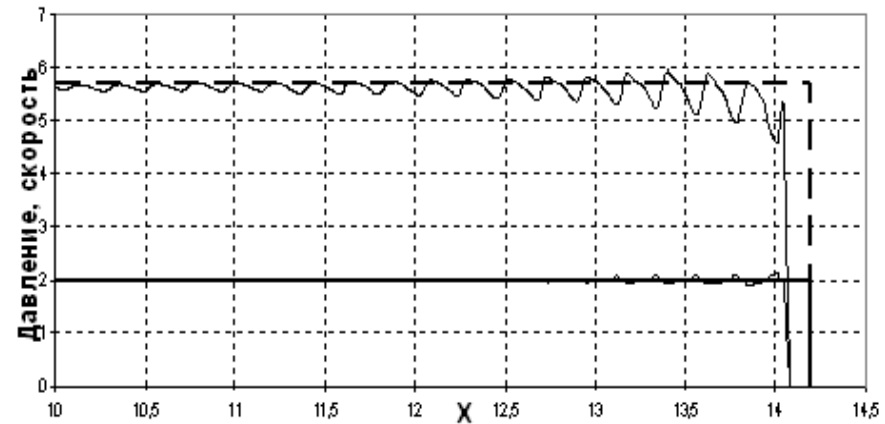
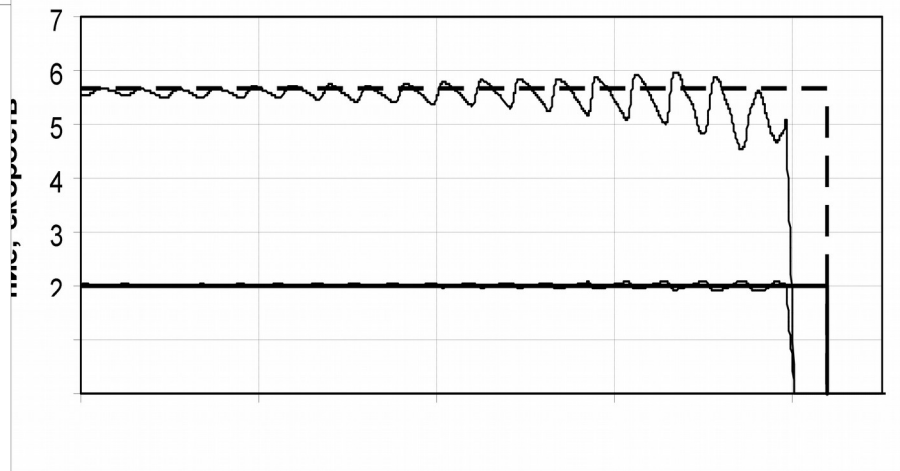
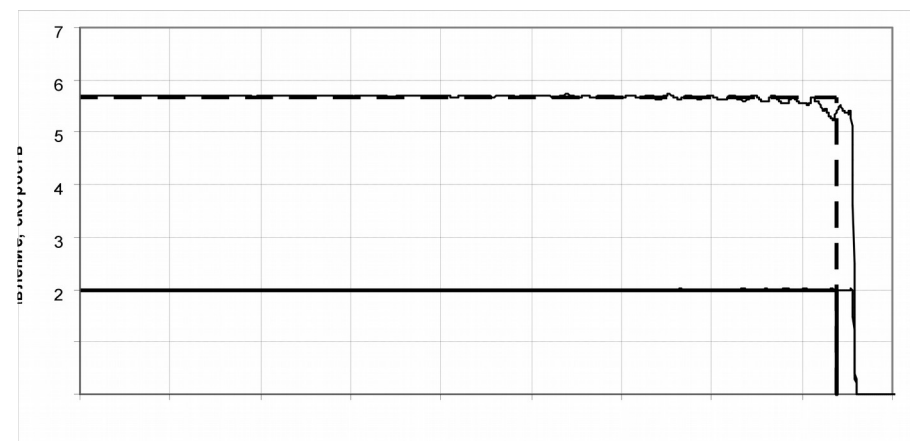
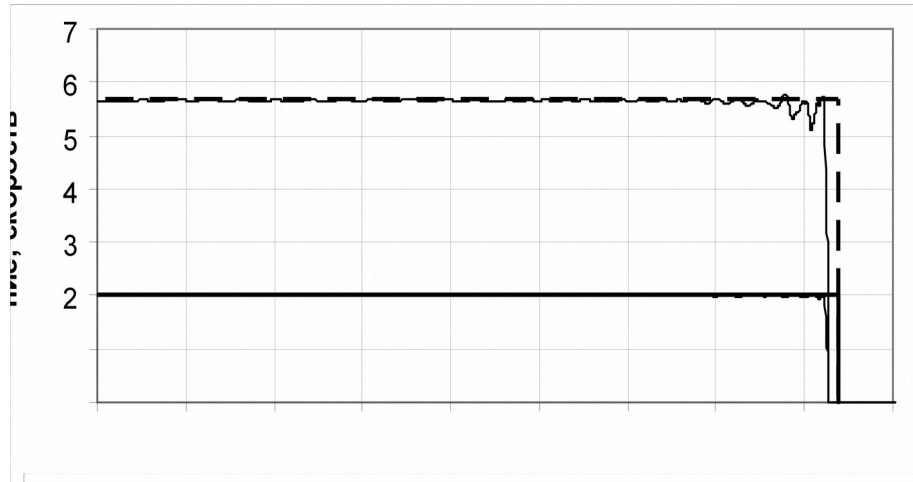


Результаты 3D расчётов



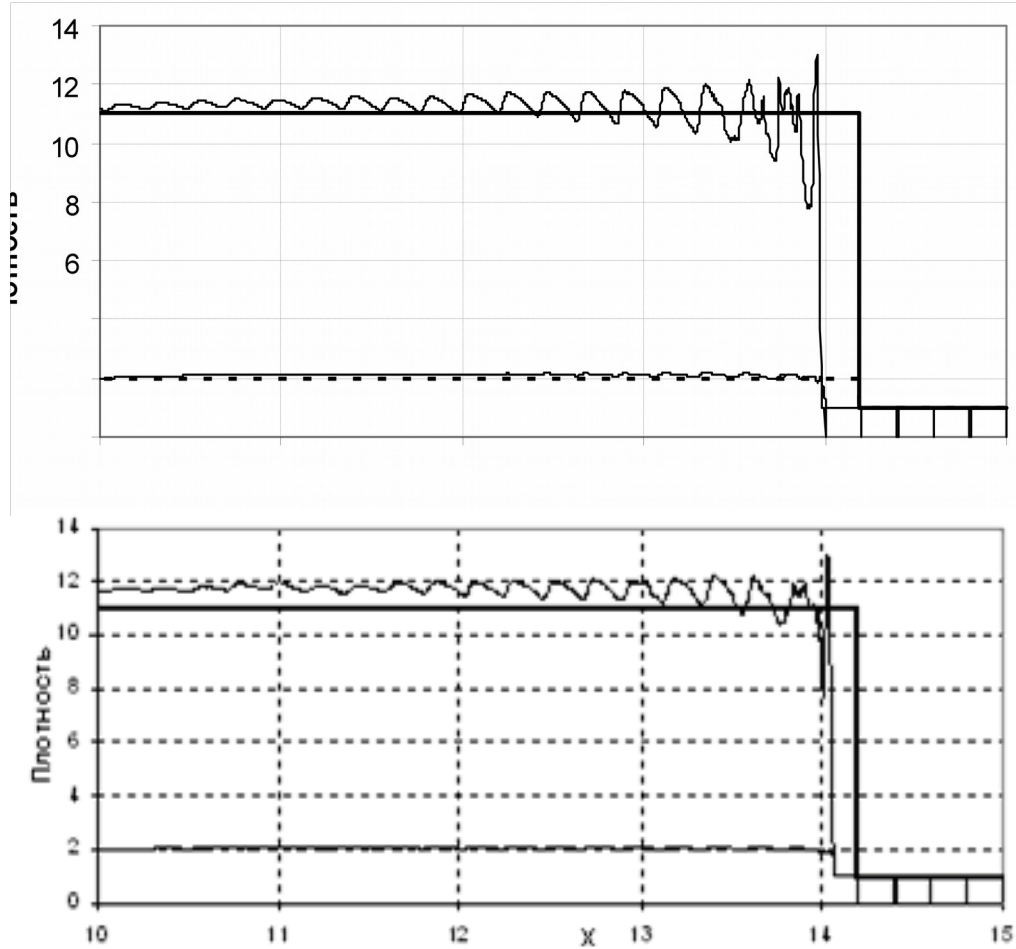
Профили давления и скорости на $t=1$

Результаты 3D расчётов



Профили давления и скорости на $t=5$

Результаты 3D расчётов



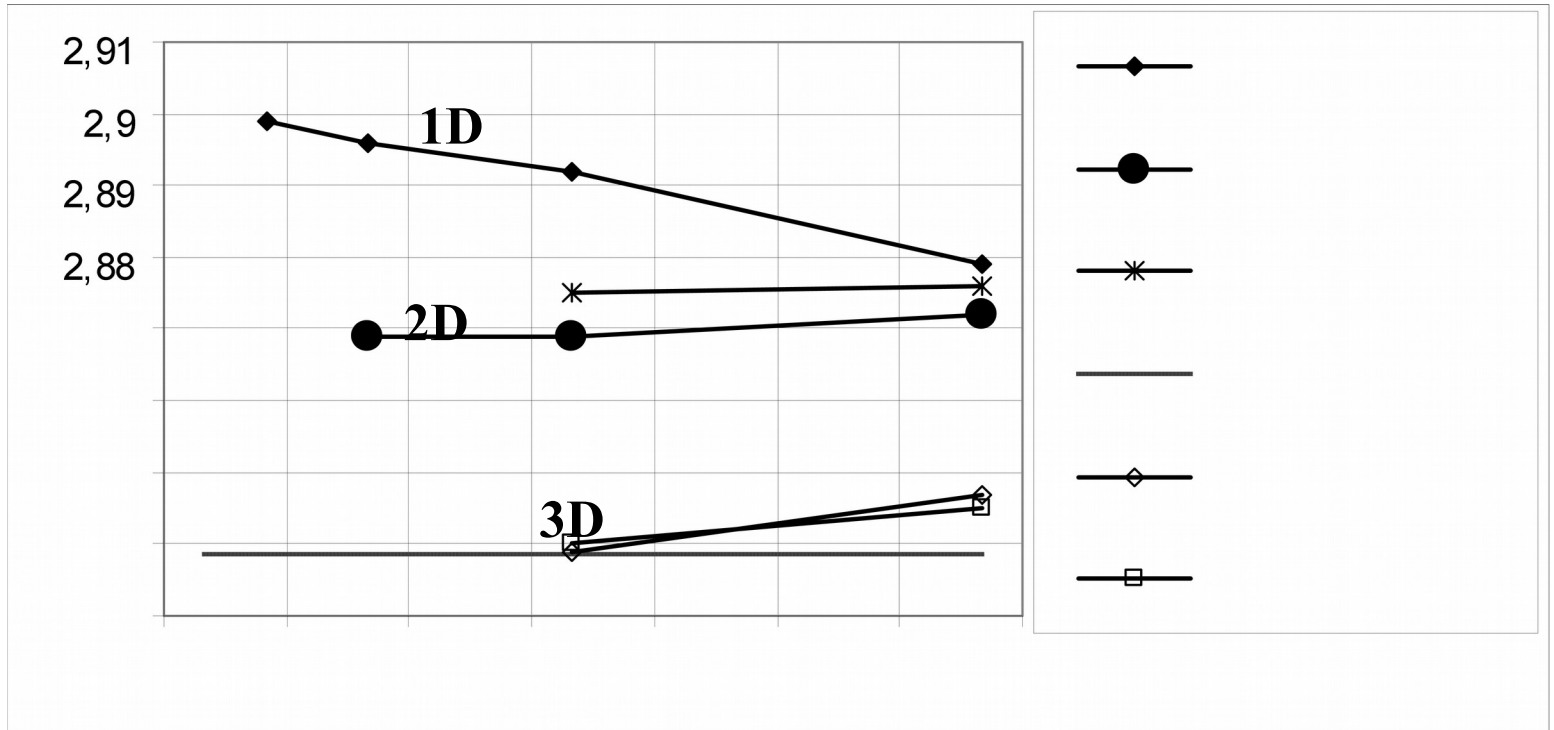
Профили плотности газов на $t=5$

Результаты 3D расчётов

t	3D_3		3D_4	
	N	2N	N	2N
1.0	2.812	2.798	2.796	2.810
1.5	2.792	2.786	2.836	2.788
2.0	2.792	2.788	2.800	2.810
3.0	2.788	2.781	2.804	2.797
4.0	2.788	2.780	2.808	2.785
5.0	2.785	2.785	2.806	2.784

Скорость УВ

Результаты расчётов



Зависимости скорости фронта УВ от размера ячеек

	1D	2D_1	2D_2	3D_1	3D_2
N	2.879	2.872	2.876	2.847	2.845
2N	2.892	2.869	2.875	2.839	2.840

Заключение

В работе проведено прямое численное моделирование распространения сильной УВ по гетерогенной смеси двух идеальных газов. Для задачи имеется аналитическое решение, полученное в предположении однократности сжатия компонентов смеси и равенства давлений компонентов.

Расчеты проведены в 1D, 2D и 3D постановках, из которых 3D постановка является наиболее приближенной к реальному случаю. Расчеты показали, что именно такая постановка дает значения скорости фронта УВ, наиболее близкие к аналитическому решению. Это подтверждает корректность предположений, сделанных при получении аналитического решения.

Спасибо за внимание!