

# ВЛИЯНИЕ АМПЛИТУДЫ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНТАКТНОЙ ГРАНИЦЫ ГАЗОВ НА ПЕРЕХОД НЕУСТОЙЧИВОСТИ РИХТМАЙЕРА – МЕШКОВА В ТУРБУЛЕНТНУЮ СТАДИЮ

*А. С. Кучкарева, Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, Е. Д. Сеньковский,  
Е. В. Левкина, О. Л. Кривонос*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

## Введение

Гидродинамические неустойчивости [1–4] и связанное с ними турбулентное перемешивание (ТП) являются одним из препятствий при попытках достижения высоких плотностей энергии при инерциальном термоядерном синтезе.

Для описания развития этих неустойчивостей применяются численные методы и различного рода полуэмпирические модели. Все они требуют калибровки по результатам экспериментов. При этом важно, чтобы длина волны  $\lambda$  и амплитуда  $a_0$  начальных возмущений на контактной границе (КГ) веществ в экспериментах были известны. Кроме этого важно знать время, за которое развитие этих возмущений переходит в турбулентную стадию.

В работе [5] из  $k$ - $\varepsilon$  модели получено, что полная ширина зоны ТП (ЗТП) при развитии Р-М неустойчивости описывается выражением:

$$L^* = L_0 \left( 1 + \frac{8\eta_*^2 k_0^2}{\rho \varepsilon_0 L_0^2} (t - t_0) \right)^p, \quad (1)$$

где  $k_0$ ,  $\varepsilon_0$  – начальные значения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации,  $L_0$  – начальная ширина зоны ТП при  $t = t_0$ ,  $\eta_*$  – константа, зависящая от уровня концентрации  $C_*$ , по которой определяются границы ЗТП (при  $C_* = 0,05$ ,  $\eta_* = 1,17$  [5]),  $t_0$  – время, при котором после прохождения ударной волны (УВ) через КГ развитие возмущений достигло стадии развитой турбулентности.

Подобный (1) закон роста ширины зоны получен ранее в [6, 7] с  $p \sim (0,25-0,32)$ . Если принять, что развитие возмущений происходит симметрично, то начальную ширину возмущенной зоны до перехода к ТП можно связать с амплитудой выражением  $a(t_0) = 0,5L_0$ . Для скорости роста амплитуды в [5] используется интерполяционная формула, которая описывает линейную и слабо нелинейную стадии развития возмущений

$$a = \frac{|a_{im}|}{1 + \frac{k}{2}|a_{im}|t} \quad a(t) \approx \frac{2}{k} \ln \left[ 1 + \frac{k}{2}|a_{im}|t \right], \quad (3)$$

где  $a_{im} = |A_+|Uk$  – значение амплитуды согласно импульсной модели Рихтмайера [2],  $k$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,  $A_+$ ,  $a_*$  – число Атвуда и амплитуда возмущений после взаимодействия УВ с КГ. С учетом принятых допущений в [5] выражения для момента перехода от этапа развития неустойчивости к ТП и зависимости ширины ЗТП от времени имеют вид:

$$t_0 = \frac{Re_* v_c}{4(a_* A_+ Uk)^2}, \quad (4)$$

$$L = \frac{4}{k} \left[ 1 + \frac{a_* |A_+| Uk^2}{5,5p} (t - t_0) \right]^p \quad (5)$$

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований влияния величины амплитуды начальных возмущений контактной границы газов разной плотности на переход неустойчивости Рихтмайера – Мешкова в турбулентную стадию, а также характер роста зоны перемешивания газов.

При расчете  $L(t)$  по формуле (5) коэффициент средней кинематической вязкости  $\nu$  газов определялся по коэффициентам динамической вязкости  $\mu$  и плотности газов, которые выбирались по данным работы [8] с учетом давления и температуры в эксперименте.

## Техника экспериментов

Схема ударной трубы (УТ), на которой проводились эксперименты, представлена на рис.1.

УТ состояла из камеры высокого (драйвер) и низкого давлений и глушителя. Камера высокого давления герметично отделялась от камеры низкого давления мембраной из лавсана толщиной  $\sigma = 0,05-0,15$  мм. Камера низкого давления состояла из входного и выходного каналов и измерительной секции с внутренним сечением  $40 \times 40$  мм.

Измерительная секция от входного канала герметично отделялась тонкой ( $\sigma \approx 2$  мкм) полимерной пленкой с заданными периодическими 3D-возмущениями, выходной канал от глушителя – мембраной из лавсана, толщиной 0,05 мм.

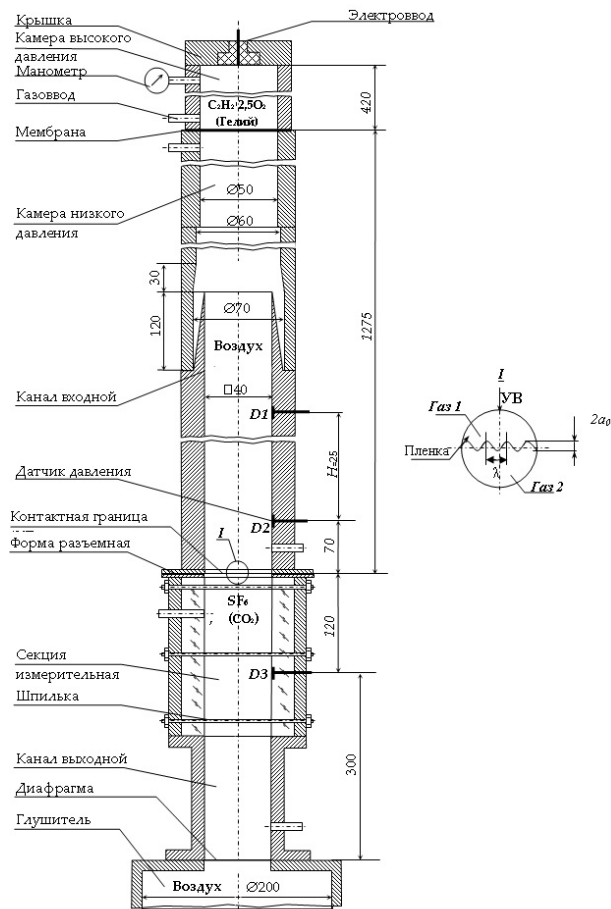
Объем измерительной секции и выходного канала заполнялся «тяжелым» газом –  $SF_6$  ( $\rho_0 = 6,5$  г/л,

$C_0 = 129,5$  м/с) или  $CO_2$  ( $\rho_0 = 1,9$  г/л,  $C_0 = 270$  м/с) при атмосферных условиях. Во входном, выходном каналах и в глушителе находился воздух ( $\rho_0 = 1,205$  г/л,  $C_0 = 342$  м/с) также при атмосферных условиях. Драйвер заполнялся газовой взрывчатой смесью (ГВС)  $C_2H_2 + 2,5O_2$  с избыточным давлением или сжатым гелием.

## Работа установки

После подрыва ГВС вниз по течению распространяется детонационная волна (ДВ). При касании ДВ мембраны последняя разрушается, происходит распад разрыва: в легкий газ (в камеру низкого давления) идет ударная волна. При прохождении УВ через тонкую пленку (границу раздела «легкого» и «тяжелого» газов) опять происходит распад разрыва. В «тяжелый» и «легкий» газ идут УВ. При этом тонкая пленка разрушается, контактная граница газов ускоряется, на ней развивается Р-М неустойчивость, приводящая к росту возмущений и образованию зоны перемешивания контактирующих газов, растущей со временем по ширине.

Регистрация течения проводилась шпирен-методом скоростной видеокамерой СФР-7 в покадровом режиме. Скорость УВ в газах определялась по временным показаниям датчиков давления D1, D2, D3 и расстоянию между ними, а также по кинограммам экспериментов. Эксперименты проводились при температуре  $T = 21 \pm 2$  °С.

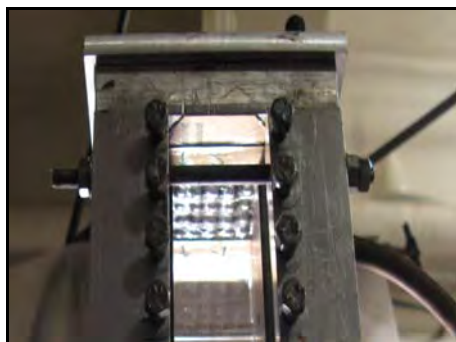


## Технология изготовления пленки с периодическими 3D-возмущениями

Экспериментальная оснастка представлена на рис. 2.

Приготавливался раствор: этилацетат, нитролак, коллодий в пропорции 4:1:0,5 соответственно. Раствор выливался на поверхность воды. Через  $\approx 1$  мин на поверхности воды образовывалась пленка, рис. 2,а. При помощи толстой нити она снималась и накладывалась на торец измерительной секции, рис. 2,в, со стрелкой прогиба  $\approx 2$  мм. На пленку устанавливалась матрица с 25 пуансонами ( $\varnothing 4$  мм) со сферическими ( $R \approx 2$  мм) торцами, рис.2б. Расстояние между пуансонами составляло  $8 \pm 0,3$  мм.

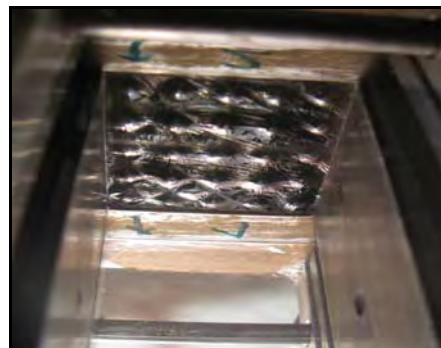
Рис. 1. Схема ударной трубы (размеры в мм)



а



б



в

Рис. 2. Экспериментальная оснастка: а – фотография секции с пленкой на пуансонах; б – матрица с пуансонами; в – фотография пленки с заданными 3D-возмущениями без пуансонов

Затем в секцию (под пленку) подавался сжатый воздух давлением  $\approx(0,005-0,001)$  атм, пленка прогибалась и в таком состоянии сушилась 24 часа. Затем воздух стравливался. В секции создавалось разрежение ( $\approx 0,005$  атм). Пленка отходила от торцов пуансонов, пуансоны поочередно снимались. На пленке оставались периодические возмущения (по форме близкие к синусоиде) с длиной волны  $\lambda = 8$  мм и заданной амплитудой  $a_0$ .

### Результаты экспериментов

В табл. 1 представлены условия проведения и некоторые результаты экспериментов. При этом символ 1 относится к газу над разделительной полимерной пленкой, символ 2 – к газу под пленкой. Параметры течения в экспериментах рассчитывались по методу Ф. К. Годунова [9] по экспериментальному значению скорости  $D_1$ .

В опытах, начальная амплитуда возмущений варьировалась от 0,5 мм до 1,8 мм. Погрешность

$a_0$  составляла  $\pm 0,2$  мм. Длина волны возмущения была постоянной и согласно [5] определялась как  $\lambda = ((\lambda_x)^{-2} + (\lambda_y)^{-2})^{-1/2}$ . В экспериментах  $\lambda_x, \lambda_y = (8 \pm 0,3)$  мм, тогда  $\lambda = (5,6 \pm 0,2)$  мм.

На рис. 3–5 представлены кинограммы некоторых экспериментов, на рис. 6 – схема обмера границ течения, на рис. 7 и рис. 8 – зависимости роста ширины зоны перемешивания  $L$  от времени  $t$ .

В табл. 2 представлены некоторые параметры течения, которые принимались при описании ширины зоны перемешивания. Отметим, что в экспериментах при описании ширины зоны перемешивания по формуле (5) варьировался только показатель степени  $p$ , а амплитуда возмущений и длина волны соответствовали заданным в экспериментах.

В табл. 2:  $Re_{max}$  – максимальное число Рейнольдса  $Re_{max} = \frac{8}{e} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{2\pi} \cdot \frac{|a_{lin}|}{v}$ , где  $a_{lin} = A_+ (2\pi/\bar{\lambda}) U a_*$ ,  $t_0$  рассчитано по формуле (4),  $M_2$  – число Маха ударной волны в газе 2.

Таблица 1

Условия проведения и результаты экспериментов

№ опыта	Вид КГ	Драйвер $P_0$ , атм	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$D_1$ , м/с	$D_2$ , м/с	$U_{КГ P}$ , м/с	$\rho_{2S}$ , г/л	$\rho_{1S}$ , г/л	$A$
893	B-SF <sub>6</sub>	He 29,5	1,39	1,074	822	452	373	52,8	5,8	0,8
894	B-SF <sub>6</sub>	ГВС 3	1,378	1,07	1236	652	644	97	8,9	0,83
895	B-SF <sub>6</sub>	ГВС 3	1,37	1,07	1304	689	687	102,8	9,2	0,84
899	B-SF <sub>6</sub>	ГВС 9	1,33	1,064	1956	1144	1110	151,9	12,7	0,85
901	B-SF <sub>6</sub>	ГВС 1	1,39	1,074	821	412	373	60,6	6,8	0,81
966	B-SF <sub>6</sub>	ГВС 3	1,378	1,2	1214	923	865	12,9	6,1	0,36
971	B-CO <sub>2</sub>	ГВС 8	1,344	1,168	1900	1580	1448	19,1	8,1	0,4
972	B-CO <sub>2</sub>	ГВС 8	1,344	1,17	1883	1604	1430	18,8	8	0,4

Обозначения:  $P_0$  – начальное полное давление ГВС в драйвере УТ (погрешность  $\pm 0,1$  атм);  $D_1 = H/(t_2 - t_1)$  – средняя скорость ударной волны в газе 1;  $\gamma_1$  – эффективный показатель адиабаты «легкого» газа;  $\gamma_2$  – эффективный показатель адиабаты «тяжелого» газа;  $D_2$  – скорость ударной волны в газе 2, полученная по методу Ф. К. Годунова;  $U_p$  – расчетное значение скорости контактной границы;  $\rho_{1S}$  – плотность в «легком» газе за отраженной волной;  $\rho_{2S}$  – плотность в «тяжелом» газе за ударной волной;  $A = (\rho_{2S} - \rho_{1S}) / (\rho_{2S} + \rho_{1S})$  – число Атвуда рассчитанное с учетом сжатия газов.

Таблица 2

Параметры течения для описании ширины зоны перемешивания

Опыт	Вид КГ	$M_2$	$a_0$ , мм	$a_*$ , мм	$a_0/a_*$	$\lambda/a_*$	$\mu_1, 10^{-7}$ Па·с	$\mu_2, 10^{-7}$ Па·с	$v, 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с	$Re_{max}, 10^6$	$t_0$ , мкс
893	B-SF <sub>6</sub>	3,5	1,8	1	1,8	5,6	306	290	1,02	0,85	2
894	B-SF <sub>6</sub>	5,2	0,9	0,52	1,73	10,8	484	300	0,74	0,9	2,6
895	B-SF <sub>6</sub>	5,3	0,6	0,33	1,82	17	510	300	0,72	0,67	3,6
899	B-SF <sub>6</sub>	8,8	1,2	0,57	2,11	9,8	732	468	0,73	2	1,2
901	B-SF <sub>6</sub>	3,2	0,55	0,3	1,8	18,7	339	253	0,88	0,3	6,5
966	B-SF <sub>6</sub>	3,4	1	0,42	2,4	13,3	430,1	351	4,1	0,076	5,4
971	B-CO <sub>2</sub>	5,1	1	0,35	2,9	16	519	494	3,7	0,14	3,5
972	B-CO <sub>2</sub>	5,9	0,8	0,27	3	20,7	519	494	3,8	0,104	4,4

По кинограммам (рис. 3–5) видно, что после прохождения ударной волны через контактную границу на границе со временем развивается зона турбулентного перемешивания. В экспериментах с относительно большой амплитудой возмущений (1,8 мм) ширина зоны выше, чем в экспериментах с малой амплитудой, явно просматриваются струи от возмущений. В эксперименте № 893 струи наблюдаются до конца регистрации, т.е. за все время наблюдения возмущения не перешли полностью в турбулентную стадию.

По зависимостям  $L(t)$  видно, что с ростом числа Маха ударной волны от 3 до 8 показатель степени роста ширины зоны перемешивания ( $p$ ) увеличивается от 0,24 до 0,6. При этом отметим, что ширину зоны ТП вместе со струями описать формулой (5) не удастся: при измерении ЗТП по вершинам струй  $p \gg 1$ . Поэтому на всех зависимостях  $L(t)$  струи не учитыва-

лись; ширина ЗТП определялась как  $L = X_1 - X_2$ , т.е. по минимальному значению (см. рис. 6).

В табл.2 представлено отношение  $\lambda/a_*$  для всех опытов. Во всех опытах, кроме опыта 893, это отношение  $\lambda/a_* > 10$ . В этих опытах по сравнению с опытом 893 не наблюдается явно выраженных струй от возмущений: развиваются лишь струи, образовавшиеся в результате перемешивания газов. Поэтому можно сказать, что при  $\lambda/a_* > 10$  время  $t_0$  перехода развития возмущений в турбулентную стадию соответствует  $t_0$ , рассчитанному по формуле (4). Строгое определение этого времени в экспериментах пока невозможно из-за того, что при малых  $a_0$  процесс перехода развития возмущений в турбулентную стадию происходит очень быстро (0,5–1) мкс, что требует применения аппаратуры с наносекундным разрешением.

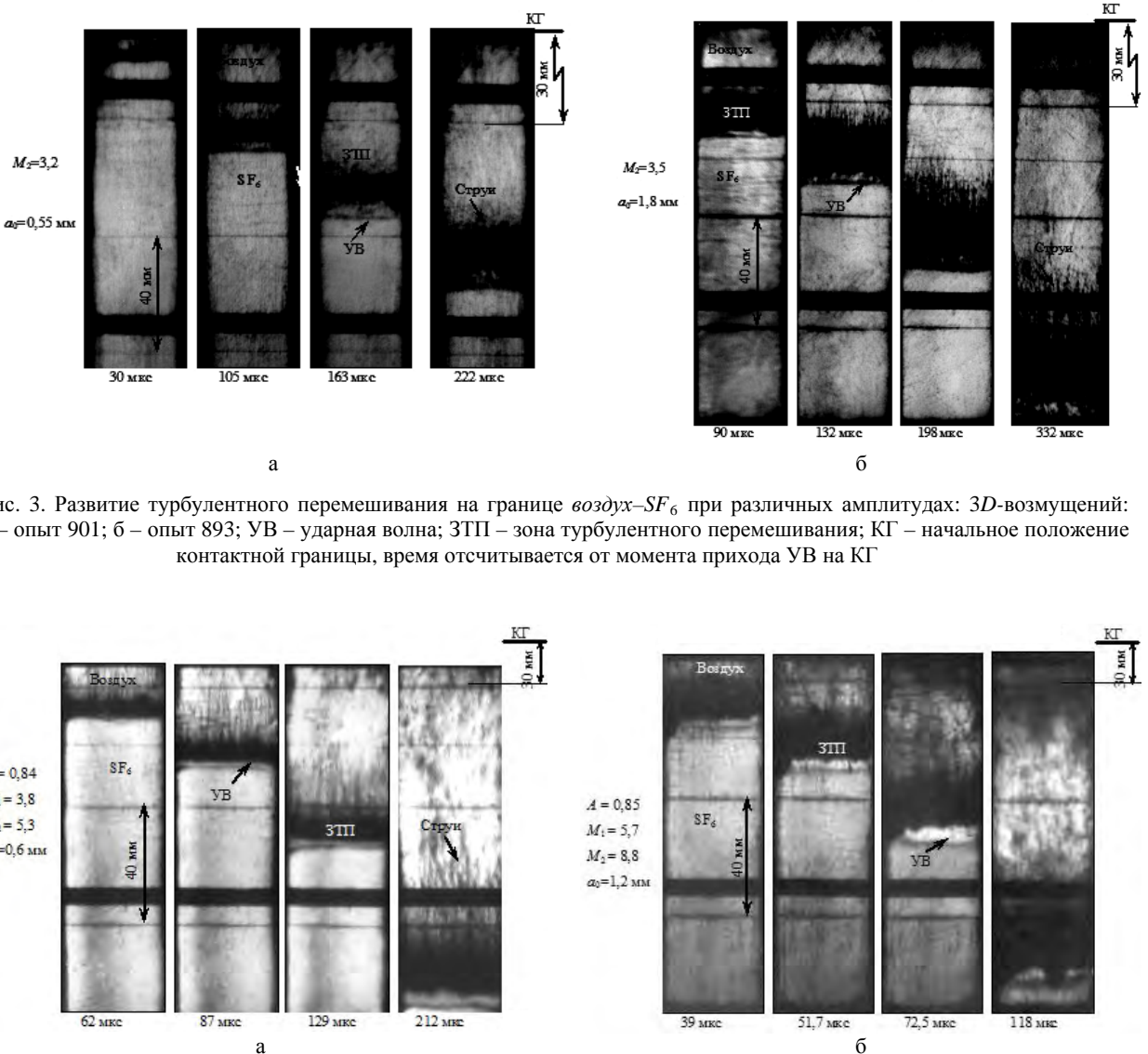


Рис. 3. Развитие турбулентного перемешивания на границе *воздух-SF<sub>6</sub>* при различных амплитудах: 3D-возмущений: а – опыт 901; б – опыт 893; УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы, время отсчитывается от момента прихода УВ на КГ

Рис. 4. Кинограммы экспериментов с границей *воздух-SF<sub>6</sub>*: а – опыт 895; б – опыт 899; УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы, время отсчитывается

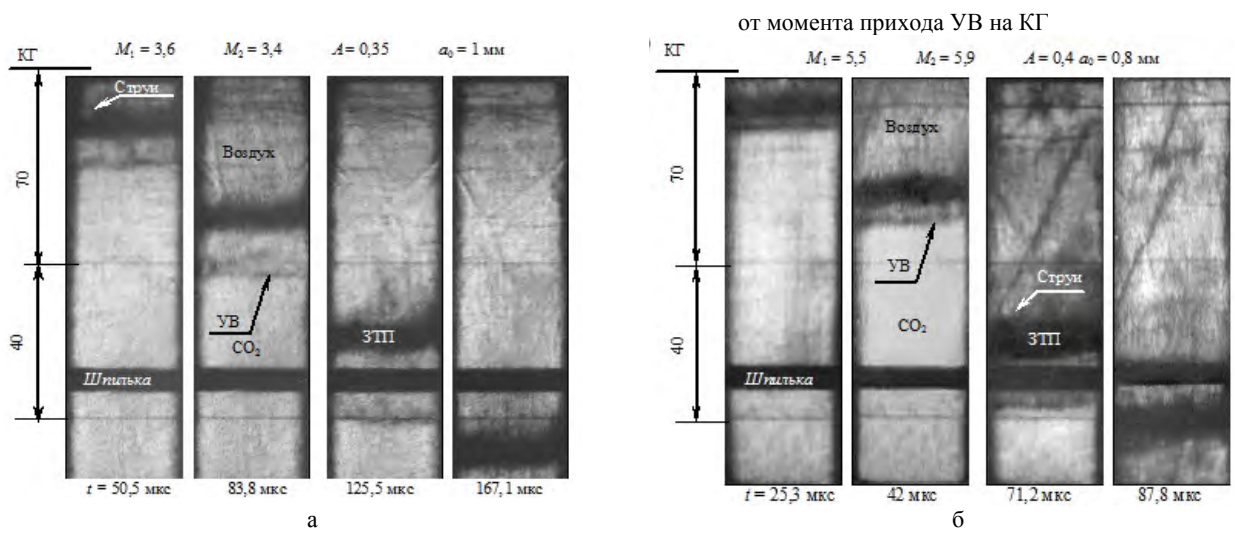


Рис. 5. Кинограммы экспериментов с  $CO_2$ : а – опыт 966; б – опыт 972 КГ – контактная граница; ЗТП – зона турбулентного перемешивания

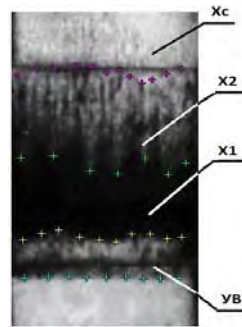


Рис. 6. Схема обмера опытов: УВ – положение ударной волны;  $X_1$  – фронт проникновения «легкого» газа в «тяжелый»;  $X_2$  – фронт проникновения «тяжелого» газа в «легкий»;  $X_c$  – фронт струй

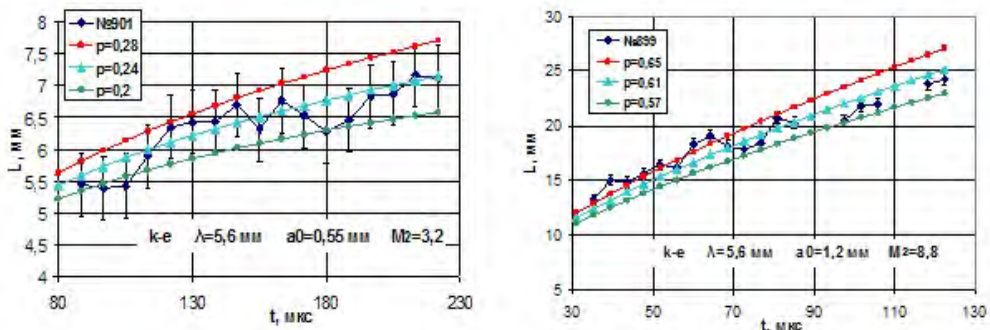


Рис. 7.  $L(t)$ -диаграммы опытов с  $SF_6$ ;  $p$  – расчетный показатель степени;  $\blacklozenge$  – эксперимент

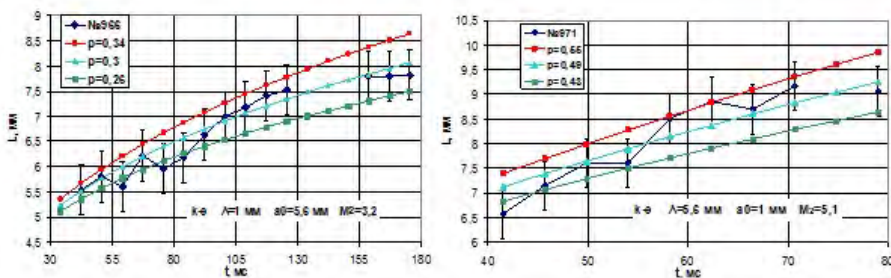


Рис. 8.  $L(t)$ -диаграммы опытов с  $CO_2$ ;  $p$  – расчетный показатель степени;  $\blacklozenge$  – эксперимент

## Выводы

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- с увеличением амплитуды начальных возмущений время перехода неустойчивости в турбулентную стадию увеличивается, а с увеличением числа Маха – уменьшается
- при  $\lambda/a_* > 10$  время  $t_0$  перехода развития возмущений в турбулентную стадию удовлетворительно описывается аналитическим решением
- с увеличением числа Маха ударной волны скорость роста зоны перемешивания увеличивается

## Литература

1. *Taylor G. I.* The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proc. Roy. Soc., 1950. V. A201. P. 192.
2. *Richtmyer R. D.* Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun. Pure Appl. Math., 1960. V. 13. P. 297.

3. *Мешков Е.Е.* Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5. С. 151–158.

4. *Helmholtz H. L. F.* Uber discontinuirlich Flusigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preuss. Akad. Wiss. Berlin. 1868. P. 215.

5. *Авраменко М.И.* О к-ε модели турбулентности. – Снежинск: Изд-во «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2005. С.76.

6. *Беленький С.З., Фрадкин Е.С.* Теория турбулентного перемешивания. Труды Физического института АН СССР им. Лебедева, 1965. Т. 29, С. 207–256.

7. *Неуважаев В.Е.* Математическое моделирование турбулентного перемешивания. – Снежинск: «РФЯЦ-ВНИИТФ», 2007. С.160.

8. *Зубарев В.Н., Козлов А.Д. и др.* Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. – М.: Энергоатомиздат. 1989, С. 232.

9. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под редакцией Ф. К. Годунова. – М.: Изд-во «Наука», 1976. С. 400.