

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

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

Гидродинамические неустойчивости [1]-[4] и связанное с ними турбулентное перемешивание 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 λ 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.

Из k - ε модели получено, что полная ширина зоны ТП при развитии Р-М неустойчивости описывается выражением:

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

где k_0 , ε_0 – начальные значения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации, L_0 – начальная ширина зоны ТП при $t = t_0$, η_* – 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 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 возмущённой 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, λ – длина волны, A_+ , a_+ – число Атвуда и амплитуда возмущений после взаимодействия УВ с КГ. С учётом принятых допущений в [5] выражения для момента перехода от этапа развития неустойчивости к ТП и зависимости ширины ЗТП от времени имеют вид:

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

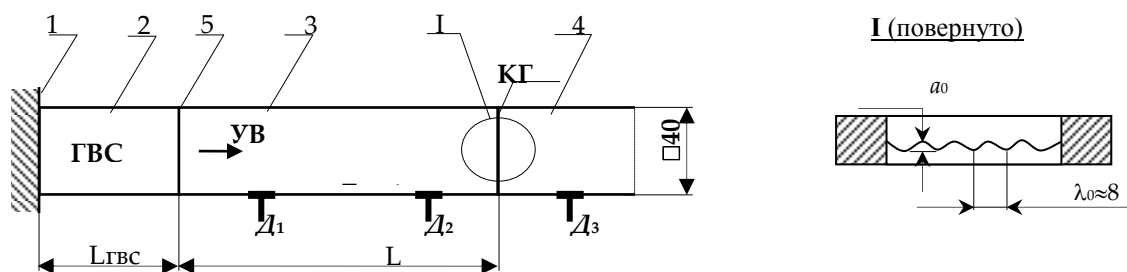
$$L = \frac{4}{k} \left[1 + \frac{a_* |A_+| Uk^2}{5,5p} (t - t_0) \right]^p \quad (5)$$

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

Техника экспериментов

Эксперименты проводились на ударной трубе. Схема трубы приведена на рисунке 1. Камера низкого давления трубы заполнялась воздухом (газ 1); измерительная секция - SF₆ (газ 2) при атмосферных условиях.

Газы 1 и 2 первоначально разделялись полимерной пленкой толщиной ≈ 2 мкм. При помощи последней на контактной границе (КГ) задавались периодические 3D-возмущения. Камера высокого давления ударной трубы (драйвер) заполнялась смесью ацетилена с кислородом (ГВС) с избыточным давлением или сжатым гелием. При подрыве смеси по газу 1 распространялась ударная волна. Регистрация течения проводилась шпирен-методом скоростной видеокамерой СФР-7 в покадровом режиме. Скорость УВ в газах определялась по временным показаниям датчиков давления D_1, D_2, D_3 и по кинограммам экспериментов.

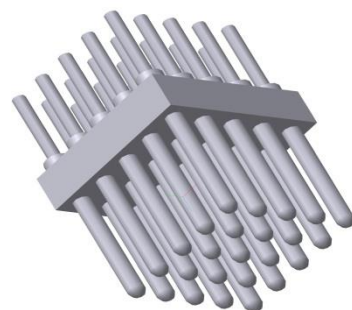
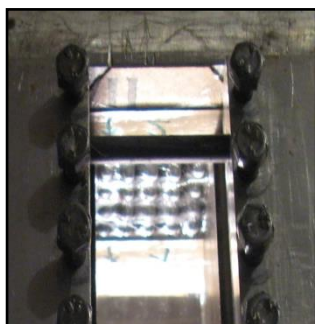


1 – жесткая стенка; 2 – камера высокого давления; 3 – камера низкого давления;
 4 – прозрачная измерительная секция, 5 – диафрагма;
 D_1, D_2, D_3 – временные отметчики для определения скорости ударной волны

Рисунок 1. Схема ударной трубы (размеры в мм)

Технология изготовления пленки с периодическими 3D-возмущениями

Приготавливался раствор: этилацетат, нитролак, коллодий в пропорции 4:1:0,5 соответственно. Раствор выливался на поверхность воды. Через ≈ 1 мин на поверхности воды образовывалась пленка.



а) фотография секции с пленкой на пуансонах; б) матрица с пуансонами;
 в) фотография пленки с заданными 3D-возмущениями без пуансонов

Рисунок 2. Экспериментальная оснастка

Она снималась и накладывалась на торец измерительной секции со стрелкой прогиба ≈ 2 мм. На пленку устанавливалась матрица с 25 пуансонами ($\varnothing 4$ мм) со сферическими ($R \approx 2$ мм) торцами. Расстояние между пуансонами составляло $8 \pm 0,3$ мм. Затем в секцию (под пленку) подавался сжатый воздух давлением $\approx (0,005 \pm 0,001)$ атм, пленка прогибалась и в таком состоянии сушилась 24 часа.

Затем воздух сгравливался. 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 заданной амплитудой a_0 . (см. рис. 2)

Результаты экспериментов

В таблице 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 .

Таблица 1.

№ опыта	Вид КГ	Драйвер P_0 , атм	γ_1	γ_2	D_1 , м/с	D_2 , м/с	$U_{КГР}$, м/с	ρ_{2S} , г/л	ρ_{1S} , г/л	A
893	B-SF ₆	He 29,5	1,39	1,074	822	452	373	52,8	5,8	0,8
894	B-SF ₆	ГВС 3	1,378	1,07	1236	652	644	97	8,9	0,83
895	B-SF ₆	ГВС 3	1,37	1,07	1304	689	687	102,8	9,2	0,84
899	B-SF ₆	ГВС 9	1,33	1,064	1956	1144	1110	151,9	12,7	0,85
901	B-SF ₆	ГВС 1	1,39	1,074	821	412	373	60,6	6,8	0,81
966	B-SF ₆	ГВС 3	1,378	1,2	1214	923	865	12,9	6,1	0,36
971	B-CO ₂	ГВС 8	1,344	1,168	1900	1580	1448	19,1	8,1	0,4
972	B-CO ₂	ГВС 8	1,344	1,17	1883	1604	1430	18,8	8	0,4

Обозначения в таблице 1:

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;

γ_1 – эффективный показатель адиабаты «легкого» газа;

γ_2 – эффективный показатель адиабаты «тяжелого» газа;

D_2 – скорость ударной волны в газе 2, полученная по методу Ф.К. Годунова;

$U_{КГР}$ – расчетное значение скорости контактной границы;

ρ_{1S} – плотность в «легком» газе за отраженной волной; ρ_{2S} – плотность в «тяжелом» газе за ударной волной; $A = (\rho_{2S} - \rho_{1S}) / (\rho_{2S} + \rho_{1S})$ – число Атвуда рассчитанное с учетом сжатия газов.

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.

Таблица 2.

Опыт	Вид КГ	M_2	a_0 , мм	a^* , мм	a_0/a^*	λ/a^*	μ_1 , 10 ⁻⁷ Па·с	μ_2 , 10 ⁻⁷ Па·с	ν , 10 ⁻⁶ м ² /с	Re_{max} , 10 ⁶	t_0 , мкс
893	B-SF ₆	3,5	1,8	1	1,8	5,6	306	290	1,02	0,85	2
894	B-SF ₆	5,2	0,9	0,52	1,73	10,8	484	300	0,74	0,9	2,6
895	B-SF ₆	5,3	0,6	0,33	1,82	17	510	300	0,72	0,67	3,6
899	B-SF ₆	8,8	1,2	0,57	2,11	9,8	732	468	0,73	2	1,2
901	B-SF ₆	3,2	0,55	0,3	1,8	18,7	339	253	0,88	0,3	6,5
966	B-SF ₆	3,4	1	0,42	2,4	13,3	430,1	351	4,1	0,076	5,4
971	B-CO ₂	5,1	1	0,35	2,9	16	519	494	3,7	0,14	3,5
972	B-CO ₂	5,9	0,8	0,27	3	20,7	519	494	3,8	0,104	4,4

В таблице: Re_{max} – максимальное число Рейнольдса $Re_{max} = \frac{8}{e} \cdot \frac{\bar{\lambda}}{2\pi} \cdot \frac{|a_{in}|}{\nu}$,

где $a_{in} = A_+ \cdot (2\pi/\bar{\lambda}) \cdot U \cdot a_*$, t_0 рассчитано по формуле (4), M_2 – число Маха ударной волны в газе 2.

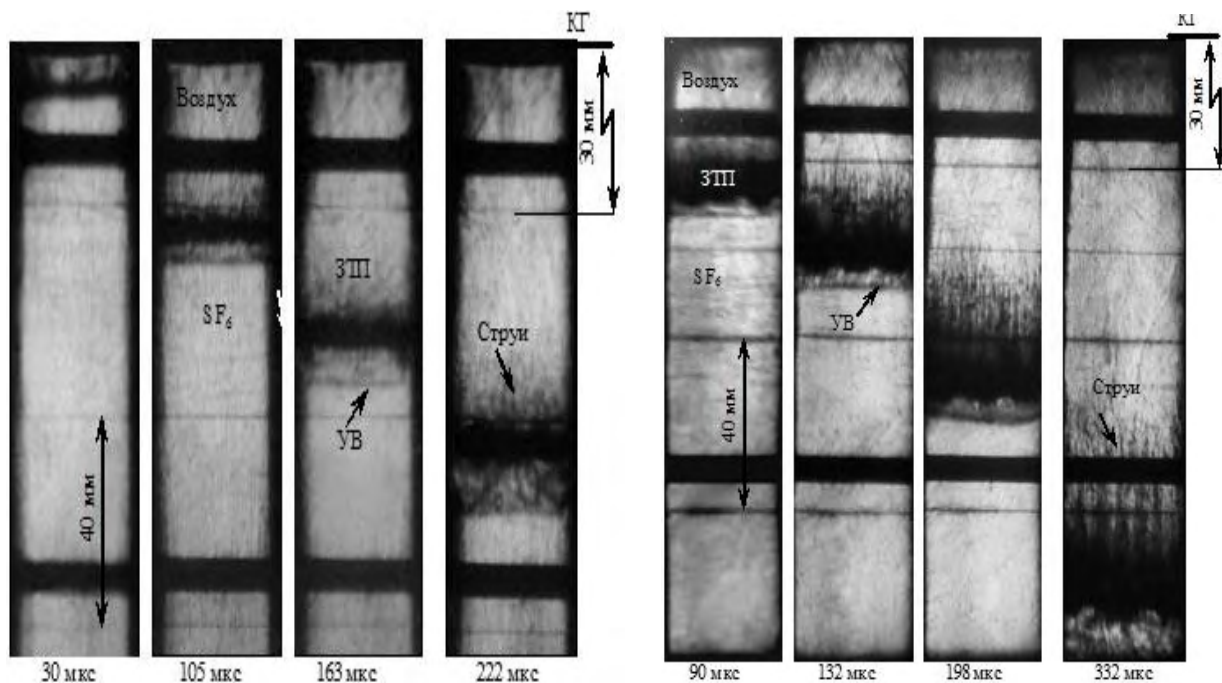
На рис. 3 - представлены кинограммы эксперимента, на рисунке 4 – зависимости роста ширины зоны перемешивания L от времени t .

В таблице 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.

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 учитывались.

В таблице 2 представлено отношение λ/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.



а) опыт 901 ($a_0=0,55\text{мм}$) ; б) опыт 899 ($a_0=1,5\text{мм}$)

УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы; время отсчитывается от момента прихода УВ на КГ

Рисунок 3. Кинограммы экспериментов с границей *воздух-SF₆*

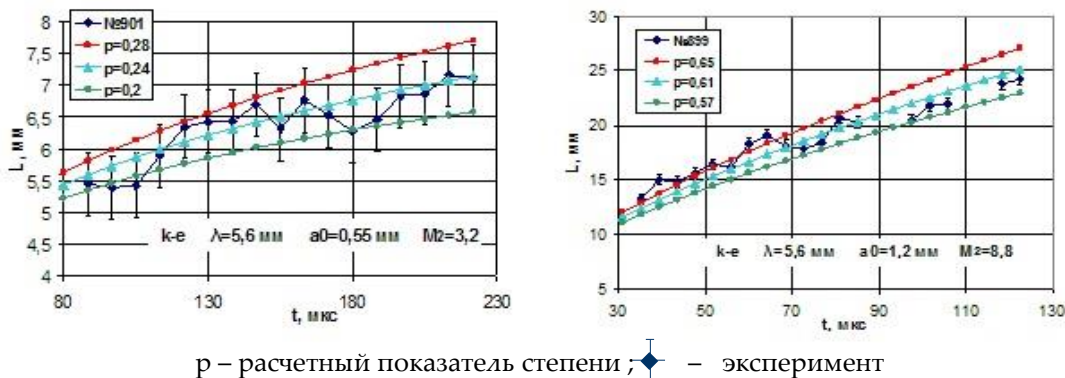


Рисунок 4. $L(t)$ -диаграммы опытов с SF_6

Выводы

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- с увеличением числа Маха УВ время t_0 перехода развития возмущений в развитую турбулентную стадию уменьшается и скорость роста зоны перемешивания увеличивается;
- при $\lambda/a_0 > 10$ время перехода развития возмущений в развитую турбулентную стадию можно описать представленным аналитическим решением, при $\lambda/a_0 \ll 10$ – нельзя, т.к. струи от возмущений существуют длительное время.

Список литературы

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, N 5. с.151-158.
4. Helmholtz H.L.F. Uber discontinuirlich Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss.// Berlin. 1868. P.215.
5. Авраменко М.И. О к-ε модели турбулентности. //Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005. – 76 с.
6. Бельский 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. 160 с.
8. Зубарев В.Н., Козлов А.Д. и др. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник. //М.: Энергоатомиздат. 1989, 232 с.
9. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Под редакцией Ф.К. Годунова. М.: //Изд-во «Наука», 1976, 400 с.

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОСОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ГРАНИЦУ РАЗДЕЛА МЕТАЛЛОВ

О.Б. Дреннов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Во многих практически важных случаях ударные волны в конденсированных средах распространяются таким образом, что их фронты оказываются непараллельными различным границам раздела или перпендикулярными вектору скорости среды перед фронтом. Основными