

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ–ТЕЙЛОРА НА ГРАНИЦЕ ГАЗ-ЖИДКОСТЬ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА СОЗДАНИЯ КОНТРОЛИРУЕМЫХ НАЧАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

*Фарин Илья Романович (postmaster@ifv.vniief.ru), Невмержицкий Николай Васильевич, Левкина Евгения Валентиновна, Соколова Анна Сергеевна, Бодров Евгений Владимирович, Сеньковский Евгений Дмитриевич*

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

Представлен способ создания контролируемых начальных возмущений на границе газ-жидкость для исследования развития неустойчивости Рэля–Тейлора. Возмущения создаются на поверхности слоя жидкости, налитого в легкогазовую пушку, при помощи вибрационной установки. Диаметр канала пушки 100 мм. Вибрационная установка представляет собой устройство с электродвигателем и эксцентриком, закрепленное на торце пушки. В зависимости от частоты колебаний установки, на свободной поверхности слоя жидкости образуются кольцевые периодические двухмерные возмущения определенной длины и амплитуды с контролируемыми размерами.

Приведены результаты экспериментальной отработки способа для исследования процесса развития возмущений с амплитудой  $a_0 = 0,65$  мм, длиной волны  $\lambda = 4$  мм и с  $a_0 = 0,95$  мм,  $\lambda = 8,7$  мм и образования зоны турбулентного перемешивания газа и жидкости. В качестве жидкости использовались вода и этиловый спирт. Слой жидкости ускорялся сжатым воздухом. Величина ускорения варьировалась от  $1,9$  мм/мс<sup>2</sup> до  $22$  мм/мс<sup>2</sup>. Регистрация течения производилась скоростной видеосъемкой.

Полученные результаты показывают, что с применением разработанного способа возможно исследовать влияние длины волны и амплитуды возмущений, поверхностного натяжения, величины ускорения слоя на переход неустойчивости Рэля–Тейлора в турбулентную стадию.

**Ключевые слова:** неустойчивость Рэля–Тейлора, контактная граница газ-жидкость, линейная стадия, вибрационная установка.

## STUDY OF THE RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY AT GAS-LIQUID INTERFACE USING METHOD OF MAKING OF CONTROLLED INITIAL PERTURBATIONS

*Farin Ilya Romanovich (postmaster@ifv.vniief.ru), Nevmerzhitskiy Nikolay Vasilelich, Levkina Evgeniya Valentinovna, Sokolova Anna Sergevna, Bodrov Evgeniy Vladimirovich, Senkovskiy Evgeniy Dmitrievich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The method of making of controlled initial perturbations at gas-liquid interface for investigation of the Rayleigh-Taylor instability is presented. The perturbations are formed at the surface of liquid layer poured in a light-gas gun using the vibration facility. The diameter of gun channel is 100 mm. The vibration facility is a device fixed on the gun end with electric motor and eccentric. Depending on the gun oscillation frequency, the ring periodical 2D-perturbations of definite length and amplitude with controlled sizes are developed at the free surface of liquid layer.

The authors present the results of experimental investigation method of perturbation growth with the amplitude of  $a_0 = 0.65$  mm and the wave length of  $\lambda = 4$  mm,  $a_0 = 0.95$  mm and  $\lambda = 8.7$  mm, and the development of turbulent mixing zone of gas and liquid. Water and ethyl alcohol is used as a liquid. The liquid layer is accelerated with compressed air. The acceleration value is varied from  $1.9$  mm/ms<sup>2</sup> up to  $22$  mm/ms<sup>2</sup>. The flow is registered using high-speed video filming.

The obtained results show that using the developed method, it is possible to study the effect of wave length and amplitude of perturbations, the surface tension and the acceleration value of a layer on the transition of the Rayleigh-Taylor instability into the turbulent stage.

**Keywords:** Rayleigh-Taylor instability, gas-liquid interface, linear stage, vibration facility.

## Введение

Гидродинамические неустойчивости Рэлея–Тейлора (Р-Т) [1], Рихтмайера–Мешкова (Р-М) [2], [3], Кельвина–Гельмгольца (К-Г) [4] и вызванное ими турбулентное перемешивание представляют собой серьезную проблему для многих отраслей современной науки и техники.

Зарождение неустойчивостей обусловлено образованием на движущейся контактной границе (КГ) сред разной плотности градиента давления, под действием которого сколь угодно малые возмущения начинают интенсивно расти.

Развитие возмущений в жидких и газовых средах приводит к образованию зоны турбулентного перемешивания (ЗТП) веществ на этой границе: легкое вещество проникает в тяжелое в виде пузырей, а тяжелое в легкое в виде струй. Ширина зоны увеличивается со временем. Турбулентное перемешивание (ТП) разрушает границы контактирующих сред, нарушает регулярность течения и приводит к хаотическому движению веществ.

Турбулентность развивается, в частности, в потоках мирового океана, в атмосфере, в астрофизических процессах (при взрывах звезд) [5–7]. Неустойчивости развиваются и в устройствах по получению высоких плотностей энергии: в мишенях инерциального термоядерного синтеза, кумулирующих системах, при сварке металлов взрывом [8].

В настоящее время одной из основных проблем в физике исследования неустойчивостей и турбулентности является вопрос о времени перехода возмущений в турбулентную стадию. Знать это время очень важно для численного моделирования неустойчивости и перемешивания. Это обусловлено тем, что рост возмущений описывается одними уравнениями, а зона ТП – другими.

Простейшим случаем начального возмущения считаются малые синусоидальные 2D-возмущения плоской границы раздела. Их называют гармоническими или одномодовыми. Процесс развития Р-Т неустойчивости при этих возмущениях условно разбивают на несколько стадий [9], [10].

1. Линейная стадия–амплитуда возмущения в идеальных жидкостях растет симметрично приблизительно экспоненциально со временем.

2. Нелинейная стадия – симметрия роста возмущений нарушается, выступы тяжелой жидкости формируются в виде струй, а легкой расширяются в виде пузырей. Струи растут быстрее, чем пузыри.

3. Стадия нарушения регулярного режима и перехода к ТП – струи искривляются, частично распа-

даются, часть пузырей укрупняется, подавляя соседей, наступает стадия хаотизации течения.

4. Стадия развитой турбулентности – хаотизация течения приводит к перемешиванию веществ, образуется турбулентная зона [15], ширина которой растет со временем пропорционально  $gt^2$ .

В настоящее время очень мало экспериментальных работ, в которых бы исследовался процесс перехода возмущений в стадию ТП. Это обусловлено тем, что трудно создать на КГ сред разной плотности возмущения без вспомогательных средств, которые предотвращают изначально взаимную диффузию веществ. Для предотвращения этой диффузии экспериментаторы применяют, в частности, тонкие полимерные пленки [11], мыльные пленки, натянутые на металлические сетки [12], делают тяжелые слои из студня водного раствора желатина, который обладает некоторой вязкостью и прочностью [10]. В указанных выше работах пленки, сетки и т. д. влияют на физику процесса перехода возмущений в стадию ТП.

В докладе дано описание способа создания контролируемых начальных возмущений на границе газ-жидкость без вспомогательных средств и приведены результаты его экспериментальной обработки.

## Техника экспериментов

Для создания контролируемых начальных возмущений на границе газ–жидкость разработана специальная вибрационная установка. Установка состоит из массивной пластины, электродвигателя переменного тока и кулачка с грузом 50 г (мощность электродвигателя 300 Вт). Она устанавливается на верхний торец легкогазовой пушки (см. рис. 1).

Пушка, рис. 1, состоит из драйвера 2, измерительной секции 7 и глушителя 12. Драйвер 2 и глушитель 12 изготавливались из стали, измерительная секция 7 – из прозрачного оргстекла. Внутренний диаметр пушки составляет 100 мм. Измерительная секция 7 герметично отделяется от глушителя 12 мембраной 10 из лавсана (толщина выбирается в зависимости от нужного ускорения от 0,01 мм до 0,5 мм). В секцию устанавливается цилиндрическая подложка 6 из пенопласта, она герметизируется в канале пушки при помощи резиновых колец. Поверх подложки 6 наливается слой жидкости: вода или этиловый спирт. Масса подложки со слоем составляла от 174 г до 435 г.

Принцип работы вибрационной установки основан на создании вибраций на пластине, которая передается через стенки пушки на жидкость. В ре-

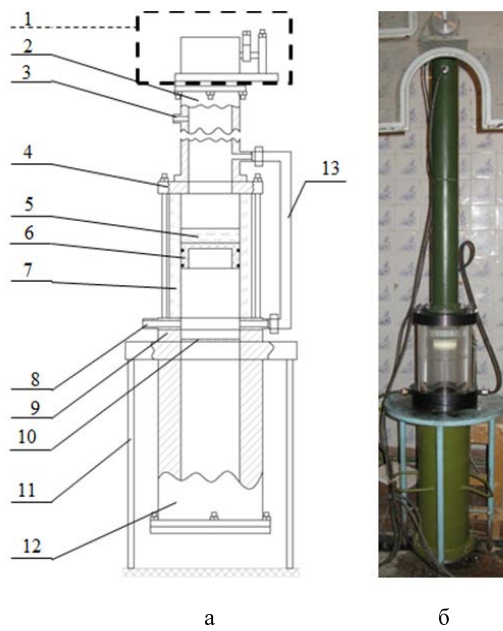


Рис. 1. Легкогазовая пушка: а – схема установки: 1 – вибрационная установка, 2 – драйвер (сталь); 3 – штуцер для подачи сжатого воздуха; 4 – верхний фланец; 5 – жидкость; 6 – подложка (пенопласт); 7 – секция измерительная (оргстекло); 8 – штуцер для манометра; 9 – нижний фланец; 10 – мембрана (лавсан); 11 – опора; 12 – глушитель; 13 – трубопровод для выравнивания давления; б – фотография установки

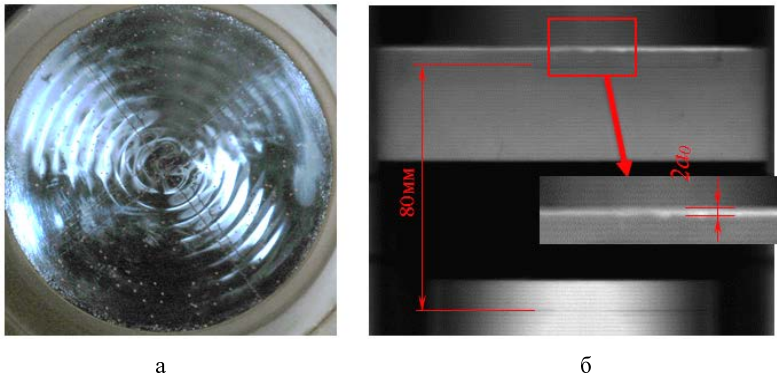


Рис. 2. Вид начальных возмущений с амплитудой  $2a_0 = 1,3$  мм,  $\lambda = 4$  мм: а – вид снизу; б – вид сбоку

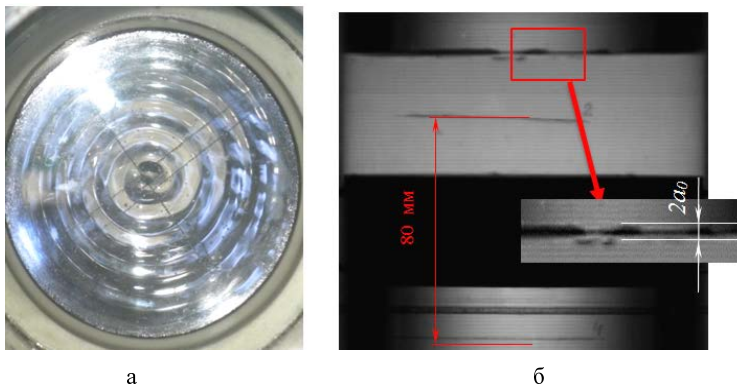


Рис. 3. Вид начальных возмущений с амплитудой  $2a_0 = 1,9$  мм,  $\lambda = 8,7$  мм: а – вид снизу; б – вид сбоку

зультате этого на поверхности жидкости образуются кольцевые возмущения с определенной длиной волны  $\lambda$  и амплитудой  $a_0$ . Величины  $\lambda$  и  $a_0$  изменяются с изменением оборотов электродвигателя.

В работе представлены экспериментальные исследования с двумя типами двумерных возмущений:  $a_0 = 0,95$  мм и  $\lambda = 8,7$  мм (опыт № 1пз), рис. 2, и с  $a_0 = 0,65$  мм и  $\lambda = 4$  мм (опыта № 2пз), рис. 3. Фото-

графии возмущений представлены на рис. 2 и 3. Кадры возмущений обмерялись на персональном компьютере (ПК), погрешность измерения составила  $\pm 0,05$  мм.

Пушка, рис. 1, работает следующим образом: после создания возмущений на поверхности жидкого слоя, в драйвер 2 подается сжатый воздух (газ). По соединительному каналу он поступает под подложку 6, что обеспечивает равенство давлений над и подслоем, предотвращая его смещение. При достижении давления газа (воздуха) выше критического, мембрана 10 разрушается. Газ из-под слоя вытекает в глушитель 12. Под действием давления газа над слоем, слой ускоряется вниз. Граница воздух-жидкость становится неустойчивой по Рэлею-Тейлору: на ней развиваются возмущения, которые со временем приводят к турбулентному перемешиванию веществ.

Регистрация течения проводится многокадровой видеокамерой при экспозиции кадра 10 мкс. Для подсветки процесса используется галогенная лампа.

### Экспериментальные результаты отработки способа

На рис. 4, 5 представлены характерные кинограммы экспериментов. По кинограммам, рис. 4 и рис. 5, видно, что изначально на поверхности жидкости в процессе движения слоя начинают расти 2D-возмущения. При этом в центре КГ в ряде случаев образуется локальное возмущение (ЛВ), рис. 5. Его образование связано с возникновением лунки в центре контактной границы при колебании жидкости.

Растущие 2D-возмущения распадаются на 3D: в жидкость они проникают в виде пузырей, а в газ – в виде струй (2D-возмущения в жидкости всегда неустойчивы). Со временем пузыри начинают объединяться, а струи – распадаться на отдельные фрагменты. Время этого распада и в работе [13] принимается за время перехода возмущений в турбулентную стадию.

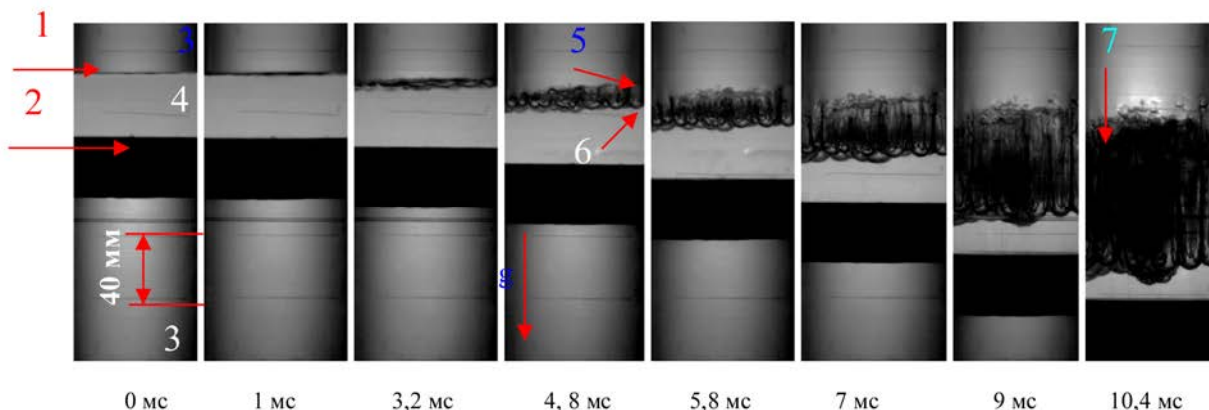


Рис. 4. Кинограммы опыта № 1пзс с  $a_0 = 0,65$  мм и  $\lambda = 4$  мм: 1 – возмущения, 2 – подложка, 3 – воздух, 4 – жидкость, 5 – струи, 6 – пузыри, 7 – ЗТП, g – ускорение слоя

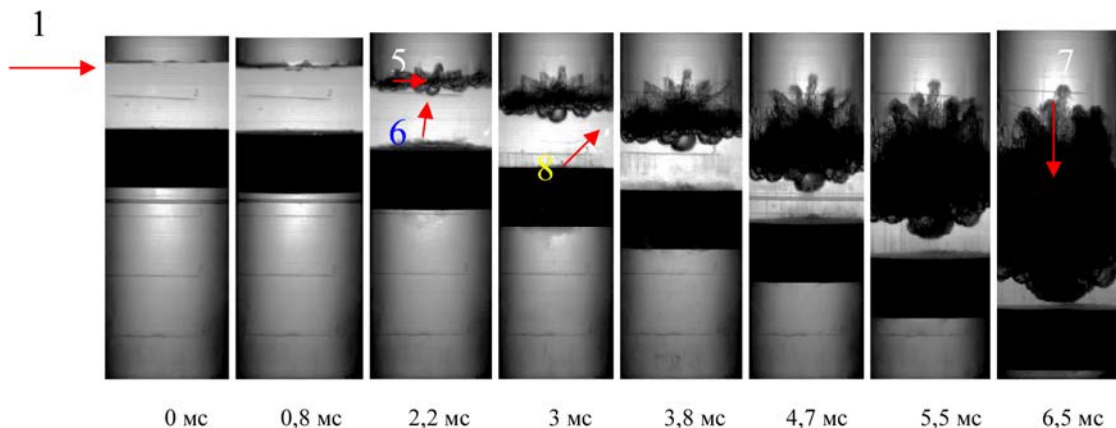


Рис. 5. Кинограммы опыта № 2пзс с  $a_0 = 0,95$  мм и  $\lambda = 8,7$  мм: 1 – возмущения, 5 – струи, 6 – пузыри, 7 – ЗТП, 8 – локальное возмущение

Кадры, полученные видеокамерой, обмерялись на ПК в программе AUTOVIEW [14]. За нулевую линию был взят нижний видимый репер, нанесенной на стекле измерительной секции, измерялись средние (по нескольким точкам) значения положения:

- проникновения легкого вещества в тяжелое (пузырей);
- проникновения тяжелого вещества в легкое (струй);
- смещение КГ (по смещению подложки).

По измеренным параметрам определялись: глубина проникновения фронта легкого вещества в тяжелое –  $h_{\text{пуз}}$ , глубина проникновения фронта

тяжелого вещества в легкое –  $h_{\text{стр}}$ , полная ширина ЗТП –  $H$ .

Ускорение КГ определялось, как тангенс угла наклона линейной части зависимости  $2S(t^2)$ , где  $S$  – смещение подложки,  $t$  – время движения слоя. Погрешность измерения границ течения оценивается  $\pm 0,5$  мм, временная погрешность составляет  $\pm 100$  мкс. Масштаб изображения определялся по известному расстоянию между реперными линиями.

На рис. 6,7 представлены характерные зависимости:  $h_{\text{пуз}}$ ,  $h_{\text{стр}}$  и  $H$  от времени. На графиках

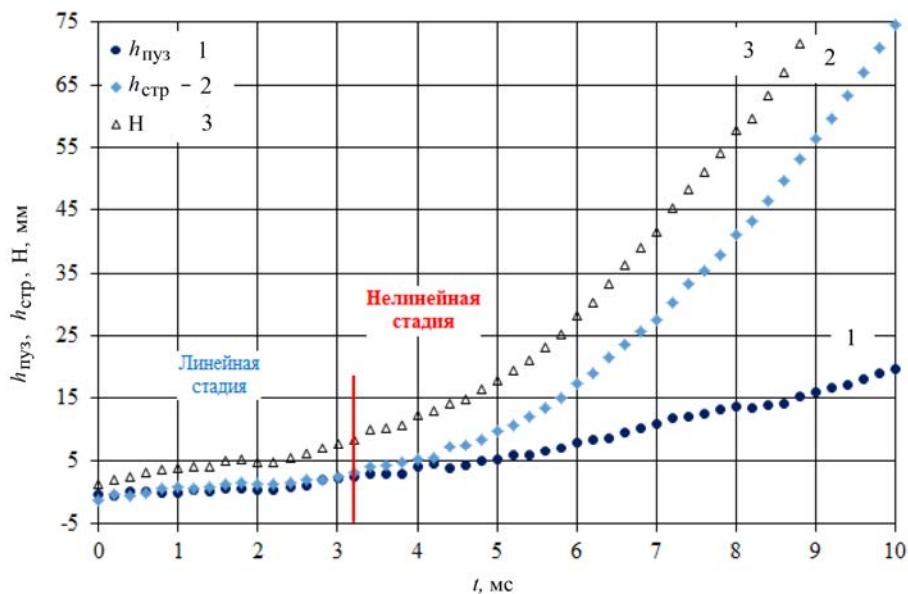


Рис. 6. Опыт № 1пз: 1 – зависимость глубины проникновения фронталегкого вещества в тяжелое от времени, 2 – зависимость глубины проникновения фронта тяжелого вещества в легкое от времени, 3 – зависимость ширины ЗТП от времени

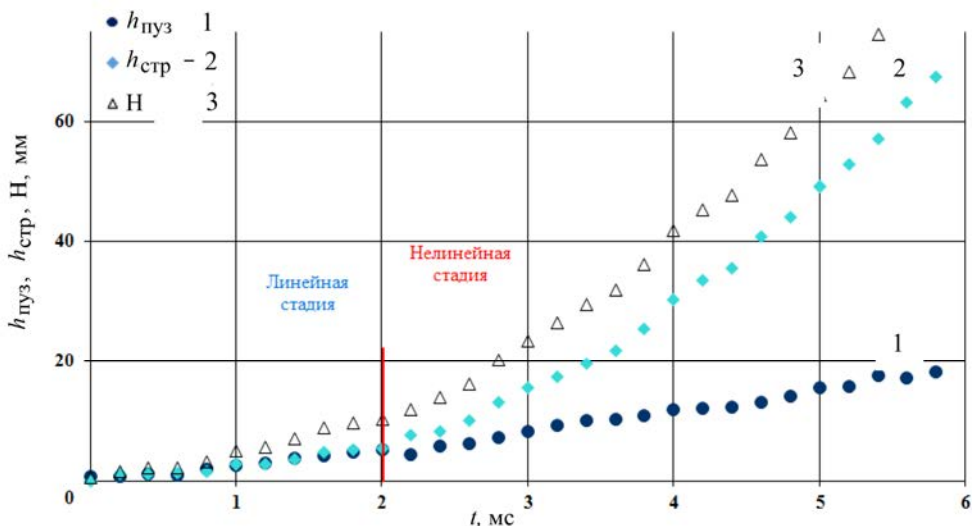


Рис. 7. Опыт № 2пз: 1 – зависимость глубины проникновения фронта легкого вещества в тяжелое от времени, 2 – зависимость глубины проникновения фронта тяжелого вещества в легкое от времени, 3 – зависимость ширины ЗТП от времени

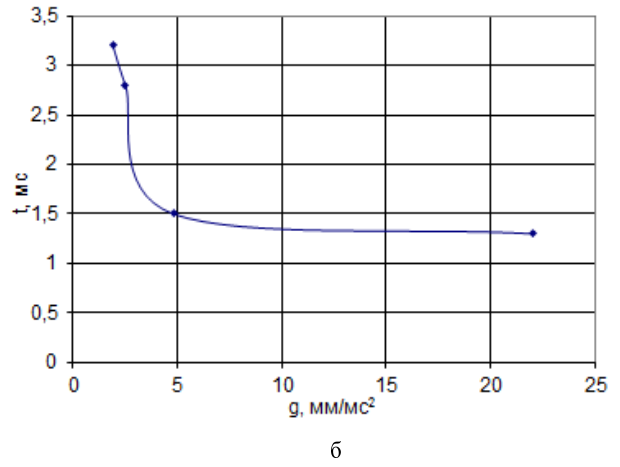
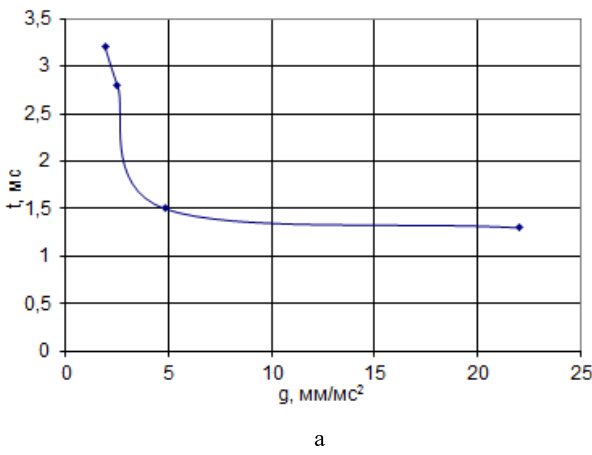


Рис. 8. Зависимость времени окончания линейной стадии от ускорения: а –  $a_0 = 0,95$  мм,  $\lambda = 8,7$  мм; б –  $a_0 = 0,65$  мм,  $\lambda = 4$  мм

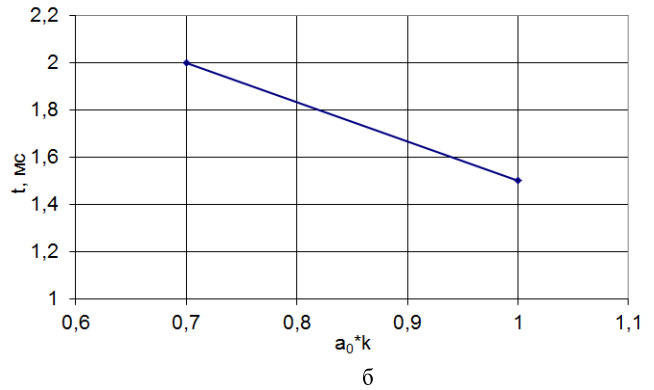
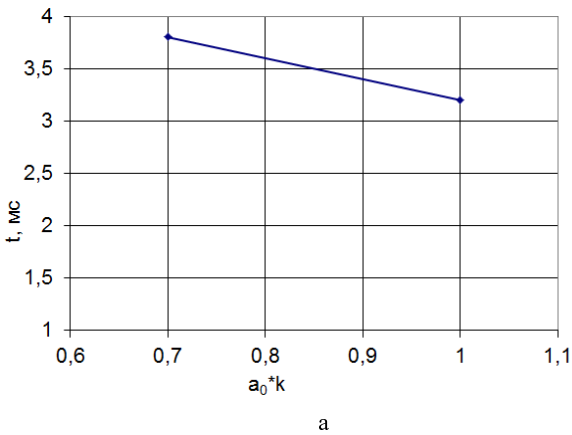


Рис. 9. Зависимости времени окончания линейной стадии развития возмущений от произведения начальной амплитуды на волновое число: а –  $g \approx 2$  мм/мс², б –  $g \approx 5$  мм/мс²

$h_{\text{пуз}}(t)$ ,  $h_{\text{стр}}(t)$ ,  $H(t)$ , рис. 6, 7, вертикальной линией нанесено время окончания линейной стадии развития возмущений, и начало нелинейной стадии. Известно, за время линейной стадии принимается время, при котором струи и пузыри растут с одинаковой скоростью, то есть, графики  $h_{\text{пуз}}(t)$  и  $h_{\text{стр}}(t)$  совпадают. За нелинейную стадию принималась стадия, при которой  $h_{\text{стр}}(t)$  больше  $h_{\text{пуз}}(t)$ .

На рис. 8 представлены графики зависимости времени окончания линейной стадии от ускорения КГ. Из графиков видно, что чем больше ускорение слоя, тем меньше время окончания линейной стадии.

На рис. 9 представлены графики зависимости времени окончания линейной стадии развития возмущений от произведения начальной амплитуды на волновое число  $k = 2\pi/\lambda$ . Из графиков видно, что чем больше произведение  $a_0$  на  $k$ , тем меньше время окончания линейной стадии.

На рис. 10 представлены зависимости времени окончания линейной стадии развития возмущений от

величины поверхностного натяжения жидкости. Из графика, следует, что с увеличением поверхностного натяжения слоя, время окончания линейной стадии увеличиваются.

На рис. 11 представлены графики зависимости времени окончания линейной стадии развития возмущений от инкремента роста возмущений  $n = \sqrt{A\delta k}$ . Эти графики показывают, что чем больше инкремент роста возмущений, тем меньше время окончания линейной стадии.

Результаты обработки экспериментов сведены в таблицу.

Получены следующие численные значения.

В экспериментах с  $a_0 = 0,95$  мм и  $\lambda = 8,7$  мм при увеличении ускорения слоя от  $1,9$  мм/мс² до  $19$  мм/мс² время окончания линейной стадии уменьшилось с  $3,8$  мс до  $1,6$  мс.

В экспериментах с  $a_0 = 0,65$  мм и  $\lambda = 4$  мм при увеличении ускорения слоя от  $2$  мм/мс² до  $22$  мм/мс² время окончания линейной стадии уменьшилось с  $3,2$  мс до  $1,3$  мс.

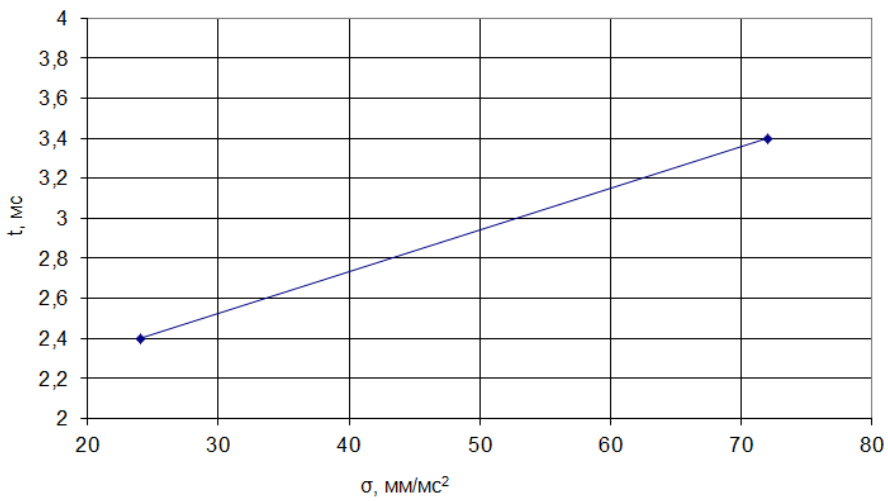


Рис. 10. Зависимость времени окончания линейной стадии развития возмущений от величины поверхностного натяжения жидкости ( $a_0 = 0,95$  мм;  $\lambda = 8,7$  мм)

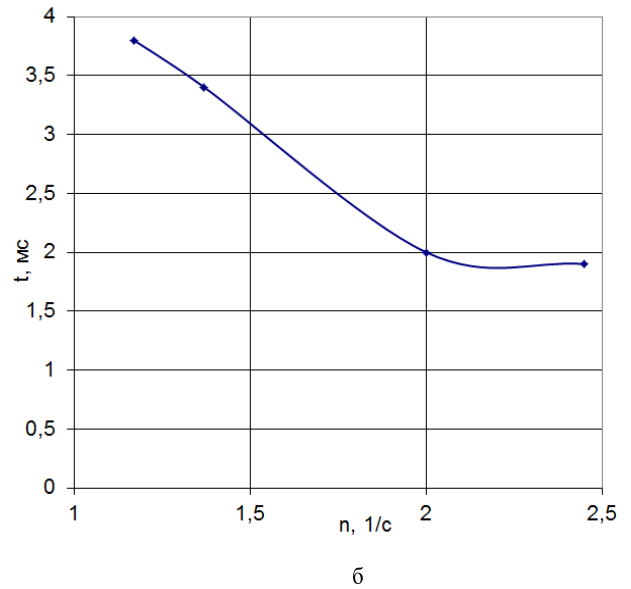
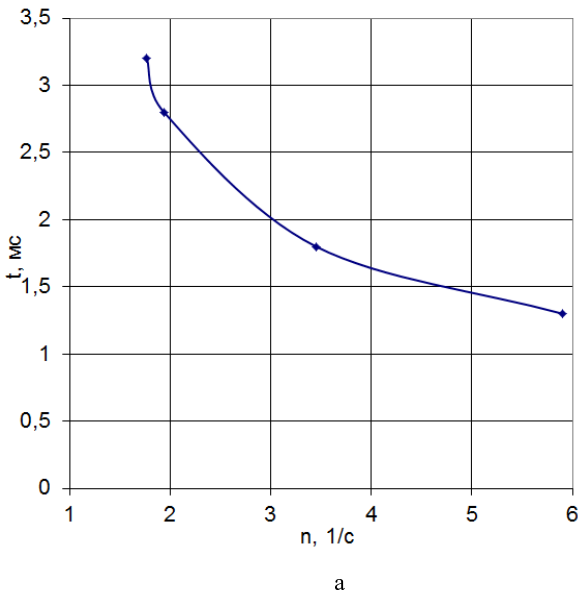


Рис. 11. Зависимость времени окончания линейной стадии развития возмущений от инкремента роста возмущений: а –  $a_0 = 0,65$  мм и  $\lambda = 4$  мм, б –  $a_0 = 0,95$  мм и  $\lambda = 8,7$  мм

Результаты обработки экспериментов

№ опыта	$m$ , г	$P$ , атм	$g$ , мм/мс <sup>2</sup>	$\lambda$ , мм	$a$ , мм	$t_l$ , мс	$n$
1пз	375	1	2	4	0,65	3,2	1,77
2пз	375	4,5	5,6	8,7	0,95	2	2
2	310	2,5	2,6	8,7	0,95	3,4	1,37
3	310	3,4	5,9	4	0,65	2,6	3
4	310	5	8,3	8,7	0,95	2,1	2,45
5	350	4,8	7,6	4	0,65	2,5	3,45
6	350	4	4,86	4	0,65	1,5	2,77
8*	290	3,5	5,4	8,7	0,95	2,4	2
10	354	2,2	2,4	4	0,65	2,8	1,94
11	354	1,5	1,9	8,7	0,95	3,8	1,17
12	174	5,1	22	4	0,65	1,3	5,9
13	206	5,3	19	8,7	0,95	1,6	----

\* – в качестве жидкости использовался спирт.  $P$  – давление в драйвере,  $g$  – ускорение слоя,  $t_l$  – время окончания линейной стадии

При уменьшении коэффициента поверхностного натяжения от  $72 \text{ эрг/см}^2$  (вода) до  $24 \text{ эрг/см}^2$  (этиловый спирт) при  $a_0 = 0,95 \text{ мм}$ ;  $\lambda = 8,7 \text{ мм}$ , время окончания линейной стадии уменьшилось с  $3,4 \text{ мс}$  до  $2,4 \text{ мс}$ .

При увеличении  $a_0 \times k$  от  $0,7$  до  $1$  при  $g \approx 2 \text{ мм/мс}^2$ , время окончания линейной стадии уменьшилось с  $2 \text{ мс}$  до  $1,5 \text{ мс}$ .

При увеличении  $a_0 \times k$  от  $0,7$  до  $1$  при  $g \approx 5 \text{ мм/мс}^2$ , время окончания линейной стадии уменьшилось с  $3,8 \text{ мс}$  до  $3,2 \text{ мс}$ .

Критерии перехода течения в турбулентную стадию пока строго не известны. Они будут вырабатываться в дальнейших исследованиях.

### Заключение

Разработан вибрационный способ создания контролируемых периодических двухмерных возмущений на свободной поверхности жидкого слоя, ускоряемого в легкогазовой пушке.

Проведена отработка способа на экспериментах по исследованию развития периодических двумерных возмущений, на поверхности жидкого слоя с амплитудами  $a_0 = 0,65 \text{ мм}$  и  $a_0 = 0,95 \text{ мм}$  и длинами волн  $\lambda = 4 \text{ мм}$  и  $\lambda = 8,7 \text{ мм}$ , соответственно. При ускорениях слоя от  $g = 1,9 \text{ мм/мс}^2$  до  $g = 22 \text{ мм/мс}^2$ .

Экспериментально установлено:

1. Увеличение ускорения слоя на порядок ведет к уменьшению на  $30\text{--}40\%$  времени окончания линейной стадии развития возмущений.

2. Уменьшение коэффициента поверхностного натяжения в 3 раза приводит к уменьшению примерно на  $30\%$  времени окончания линейной стадии развития возмущений.

3. Увеличение инкремента роста возмущений в 2 раза, ведет к уменьшению на  $30\text{--}50\%$  времени окончания линейной стадии развития возмущений.

4. Увеличение произведения начальной амплитуды возмущений на волновое число на  $30\%$  приводит к уменьшению на  $16\text{--}36\%$  времени окончания линейной стадии развития возмущений.

### 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. Vol. 13. P. 297.

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

4. Helmholtz H. L. F. Uber discontinuirlisch Flussigkeits-Bewegungen. Monatsberichte Konigl. Preus. Akad. Wiss. Berlin. 1868. P. 215.

5. Бабкин Я. Б. Численное моделирование турбулентного растекания жидкости под действием силы тяжести в мелководных устьях рек // МЖГ. 1999. № 3. С. 172–178.

6. Гидродинамическая неустойчивость. Пер. Мони́на А. С. М: Мир, 1964. С. 372. [Hydrodynamic instability. Edited by G. Birkhoff, R. Bellman and C. C. Lin].

7. Городничев А. В., Долголева Г. В., Жмайло В. А., Новикова Е. А., Стаценко В. П. Численное моделирование взаимодействия пульсарного ветра с оболочкой Сверхновой в Крабовидной туманности // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ // Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2007. С. 26–39.

8. Дреннов О. Б. Сдвиговая неустойчивость в средах, обладающих прочностью. Монография. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2014. С. 199.

9. Разин А. Н. Моделирование неустойчивости и турбулентного перемешивания в слоистых системах. Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2010. С. 415.

10. Мешков Е. Е. Неустойчивость Рэлея–Тейлора: Исслед. в лаборатор. экспериментах. Саров. Саранск: Тип. «Крас. Окт.», 2002. С. 68.

11. Lewis DJ. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. Proc. Roy. Soc. 1950. A202. С. 82–90.

12. Тяктев А. А., Павленко А. В., Аникин Н. Б., Пискунов Ю. А., Бугаенко И. Л., Андреев А. М., Мокрушин С. С. Экспериментальное исследование характеристик зоны турбулентного перемешивания газовых сред, вызванной действием неустойчивости Рэлея–Тейлора, при числах Атвуда  $0,2$  и  $0,8$ . Снежинск: ФГУП «РФЯЦ ВНИИТФ», 2015.

13. Prestridge K., Orlicz G., Balasubramanian S., Balakumar B. J. Experiments of the Richtmyer-Meshkov instability. Royal Society Publishing, 28 November 2013. С. 5.

14. Poduvalov A. N. The Proc of the 6th IWPTCW, Marseille, France. 1997. P. 411.

15. Невмержицкий Н. В. Гидродинамические неустойчивости турбулентное перемешивание веществ. Саров: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2018. С. 246.