

## ЭВОЛЮЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ЖИДКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ПОЛУСФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РЭЛЕЯ – ТЕЙЛОРА

**Н. В. Невмержицкий, Е. А. Сотсков, О. Л. Кривонос**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Представлены результаты экспериментальных исследований эволюции локальных возмущений при развитии неустойчивости Рэля–Тейлора на внутренних и наружных поверхностях цилиндрических и полусферических оболочек в условиях имплозии и эксплозии.

Оболочки из низкопрочного студня водного раствора желатина ускорялись под действием продуктов взрыва смеси ацетиленов с кислородом. В реализованных условиях нагружения студень вел себя как жидкость. Локальные возмущения задавались на неустойчивых поверхностях в виде цилиндрических каверн ( $\varnothing 2,5 \times 3$  мм) или образовывались при интерференции УВ. Регистрация течения проводилась киносъемкой. Для сравнения приводятся результаты развития аналогичных возмущений на плоской КГ.

Получено, что на наружных поверхностях при имплозии цилиндрических и полусферических оболочек радиальная скорость проникновения возмущений в жидкость выше, а на внутренних поверхностях при эксплозии – ниже по сравнению со скоростью возмущений на плоской КГ.

*Ключевые слова:* неустойчивость Рэля–Тейлора, локальные возмущения, газовая взрывчатая смесь, скорость роста возмущений.

### Введение

Локальные неоднородности в материале оболочки мишеней инерциального термоядерного синтеза (ИТС), конструктивные элементы, неравномерность поля давления могут приводить к образованию локальных возмущений (ЛВ), занимающих малую площадь контактной поверхности. При схождении оболочки эти возмущения из-за неустойчивости Рэля–Тейлора (Р–Т) [1] интенсивно развиваются и могут ее прорвать. Это приводит к снижению энерговыделения в ИТС.

В работах [2–5], в частности, показано, что локальное возмущение на неустойчивой поверхности плоского жидкого слоя развивается в виде квазиокруглого пузыря. Пузырь растет по глубине как  $h_{ЛВ} = \beta_{ЛВ} A g t^2$  и со временем выходит на автомодельный режим ( $\beta_{ЛВ}$  – коэффициент, характеризующий скорость (темп) проникновения полюса возмущения в жидкость;  $A = (\rho_T - \rho_L) / (\rho_T + \rho_L)$  –

число Атвуда;  $\rho_T, \rho_L$  – плотности «тяжелого» и «легкого» веществ соответственно;  $g$  – ускорение контактной границы (КГ);  $t$  – время).

Для понимания физики развития таких возмущений и тестирования численных методов важно иметь экспериментальные данные по закономерностям развития возмущений при имплозии и эксплозии цилиндрических и сферических оболочек. Такие данные представлены в этой работе.

### 1. Техника экспериментов

Оболочки изготавливались из студня водного раствора желатина весовой концентрации (3÷4,4)% методом отливки в разборные матрицы. Прочность такого студня составляла  $\sigma \approx 0,001$  МПа. Имплозия и эксплозия оболочек происходила в специальных устройствах под действием продуктов взрыва смеси  $C_2H_2 + 2,5O_2$  (ПВ ГВС). Равно-

весное давление в ПВ составляло  $\approx 13,5$  атм, максимальная величина ускорения контактной границы –  $\approx 5 \cdot 10^4$  м/с<sup>2</sup>.

### 1.1. Эксперименты с цилиндрическими оболочками

**Имплозия оболочек.** Схема экспериментального устройства по исследованию локального возмущения, заданного на наружной поверхности цилиндрической оболочки приведена на рис. 1. Высота оболочки составляла  $h=40$  мм, внутренний радиус  $R_{вн}=55$  мм, наружный радиус  $R_{н}=70$  мм. На наружной поверхности оболочки задавалось четыре радиальных симметрично расположенных цилиндрических ЛВ диаметром 2,5 мм и глубиной 3 мм (опыт 646). Внутри оболочки находился воздух при атмосферных условиях. Взрывчатая смесь инициировалась в 40 точках, и посредством сетчатого распределителя детонация передавалась к 1200 точкам, равномерно расположенным по высоте и периметру устройства. Под действием давления ПВ оболочка сходилась к оси симметрии.

Исследования развития ЛВ от интерференции УВ проводились на подобном устройстве. Однако в отличие от предыдущих опытов здесь взрывчатая смесь инициировалась четырьмя симметрично расположенными электроискровыми разрядами. Геометрия цилиндрической оболочки:  $R_{н} \approx 57$  мм,  $R_{вн} = 42$  мм,  $h = 20$  мм. После инициирования ГВС в каждой из четырех точек образовывалась детонационная волна, которая, отражаясь от оболочки и стенок сборки, вызывала серию нестационарных ударных волн (УВ). Столкновение УВ приводило

к местному повышению давления на границе раздела ПВ-студень, что вызывало возникновение локального возмущения, растущего с течением времени при схождении оболочки к оси (опыт 9).

**Эксплозия оболочек.** Исследование развития ЛВ на неустойчивой внутренней поверхности сходящейся цилиндрической оболочки ( $R_{н}=38,5$  мм,  $R_{вн}=18$  мм,  $h=30$  мм) проводилось по схеме рис. 1. На внутренней поверхности оболочки задавались два локальных возмущения в виде каверн цилиндрической формы: первое – диаметром 2,5 мм и глубиной 3 мм, второе – диаметром 1,5 мм и глубиной 1,5 мм (опыт 958).

Инициирование ГВС осуществлялось электроискровым разрядом в одной точке, расположенной по центру оболочки. Под действием ПВ оболочка разлеталась в атмосферную среду. На ее внутренней поверхности развивались заданные локальные возмущения.

### 1.2. Эксперименты с полусферическими оболочками

**Имплозия оболочек.** Схема экспериментального устройства, на котором проводились исследования развития ЛВ на наружной поверхности полусферической оболочки ( $R_{н}=50$  мм,  $R_{вн}=40$  мм), сходящейся к центру, представлена на рис. 2.

Во время отливки оболочки при помощи съемных пуансонов на ее наружной поверхности (на высоте 20 мм от ее торца) задавалось четыре радиальных локальных цилиндрических возмущения диаметром 2,5 и глубиной 3 мм (опыт 377).

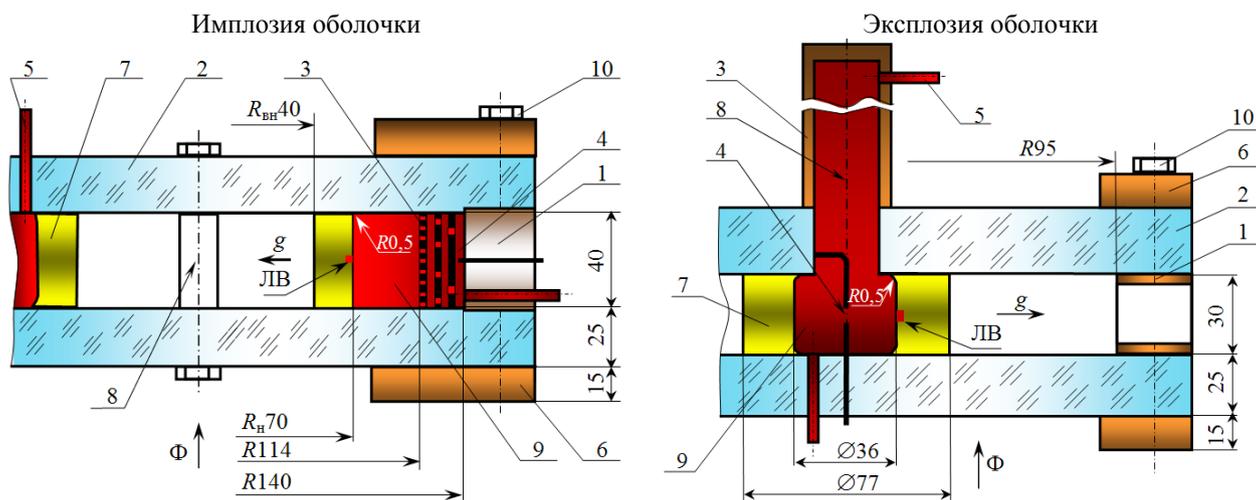


Рис. 1. Схемы экспериментальных устройств для ускорения цилиндрических студневых оболочек ПВ ГВС (размеры в мм): 1 – корпус; 2 – пластина; 3 – распределитель детонации ГВС при имплозии, камера ГВС при эксплозии; 4 – электроискровой зазор; 5 – газоввод; 6 – пластина силовая; 7 – оболочка; 8 – ось симметрии; 9 – объем ГВС; 10 – элементы крепления; ЛВ – локальное возмущение;  $g$  – направление ускорения оболочки;  $\Phi$  – направление фотосъемки

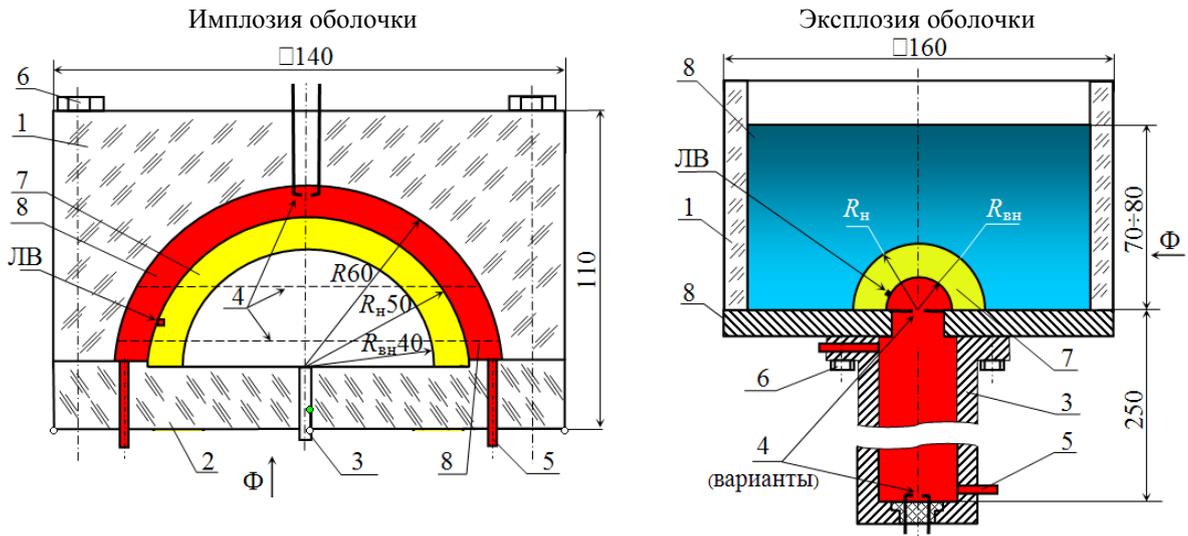


Рис. 2. Схемы экспериментальных устройств для ускорения полусферических студневых оболочек ПВ ГВС (размеры в мм): 1 – корпус; 2 – днище; 3 – воздуховод при имплозии, камера ГВС при эксплозии; 4 – электроискровой зазор; 5 – газовойд; 6 – элементы крепления; 7 – оболочка; 8 – камера ГВС при имплозии, слой воды при эксплозии; ЛВ – локальное возмущение; Φ – направление фотосъемки

Под действием собственного веса оболочка сильно проседала, поэтому в ее внутреннюю полость через воздуховод перед опытом подавался сжатый воздух под избыточным давлением  $\approx 0,005$  атм. Под действием этого воздуха оболочка выравнивалась и приобретала форму, близкую к полусферической (прогиб полюса составлял  $\approx 1$  мм). В этих опытах взрывчатая смесь инициировалась в десяти электроискровых зазорах, расположенных равномерно на внутренней полусферической поверхности устройства.

**Эксплозия оболочек.** Схема постановки опытов по исследованию развития ЛВ на внутренней поверхности расходящейся полусферической оболочки представлена на рис. 2. Устройство представляло собой бак прямоугольной формы с прозрачными (из оргстекла) стенками. На дно бака устанавливалась предварительно отлитая по матрицам полусферическая оболочка ( $R_n = 23,5$  мм,  $R_{вн} = 16,5$  мм). Поверх оболочки наливался слой воды, верхняя граница которого контактировала с атмосферной средой. Вода поверх оболочки предотвращала раскрытие стыка оболочки с дном контейнера и благодаря силе Архимеда значительно уменьшала гравитационную силу, под действием которой студневая оболочка проседала. Диаметр ЛВ составлял 2,5 мм, глубина – 3 мм (опыт 295). Взрывчатая смесь инициировалась в

одной точке, расположенной либо по центру оболочки, либо внизу камеры ГВС. После подрыва ГВС оболочка расширялась, на ее внутренней поверхности развивалась Р-Т неустойчивость, а вода вытеснялась вверх. В опытах установлено, что расположение точки инициирования не оказало влияния на развитие ЛВ.

Исследовалось развитие ЛВ только на стадии ускорения контактных границ оболочек. Стадия торможения в данной работе не рассматривалась.

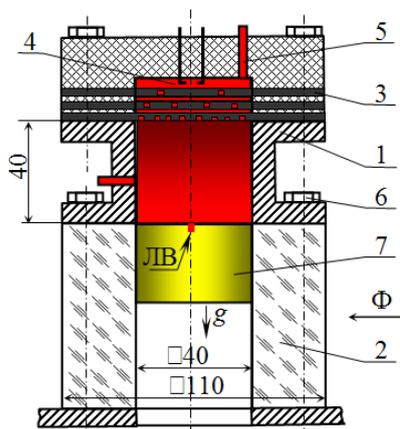
### 1.3. Эксперименты с плоским слоем

Ускорение плоского слоя студня ПВ ГВС проводилось в устройствах, схемы которых представлены на рис. 3. Исследовалось развитие цилиндрического ЛВ диаметром 2,5 и глубиной 3 мм (опыт 644) и развитие возмущения, образовавшегося от интерференции УВ при одной точке инициирования ГВС (опыт 904). Слой студня ускорился в атмосферную среду.

Во всех опытах на поверхности контактной границы, не занятой ЛВ, возмущения специально не задавались. Они образовывались от разноминимичности детонационной волны. Их характерный размер оценивается  $< 0,3$  мм.

Регистрация течения в экспериментах производилась скоростной фотосъемкой в проходящем свете.

Исследование развития ЛВ ( $\varnothing 2,5 \times 3$ ) мм



Исследования развития ЛВ от интерференции ударных волн

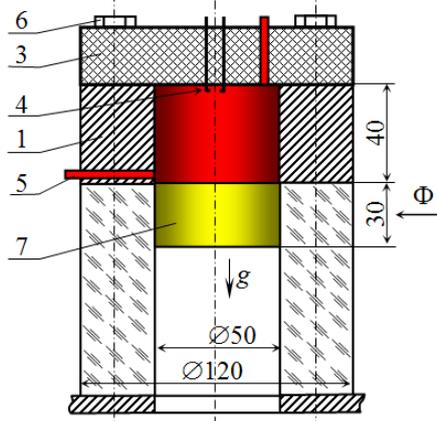


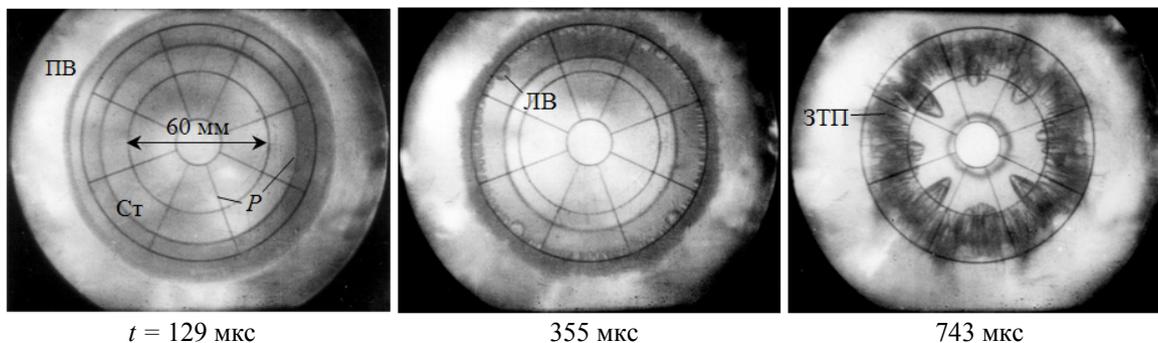
Рис. 3. Схемы экспериментальных устройств для ускорения плоских слоев ПВ ГВС (размеры в мм): 1 – камера ГВС; 2 – измерительная секция; 3 – распределитель детонации ГВС, крышка для устройства при исследовании ЛВ от интерференции волн; 4 – электроискровой зазор; 5 – газовод; 6 – элементы крепления; 7 – слой студня; ЛВ – локальное возмущение; Ф – направление фотосъемки

## 2. Результаты экспериментов

На рис. 4 представлены кинограммы развития локальных возмущений на наружной поверхности сходящейся цилиндрической оболочки, образо-

вавшихся при интерференции УВ, развития ЛВ диаметром 2,5 мм, глубиной 3 мм на наружной поверхности сходящейся полусферической оболочки и развития ЛВ диаметром 2,5 мм, глубиной 3 мм на внутренних поверхностях расходящихся

Имплозия цилиндрической оболочки (опыт 9)



Имплозия полусферической оболочки (опыт 377)

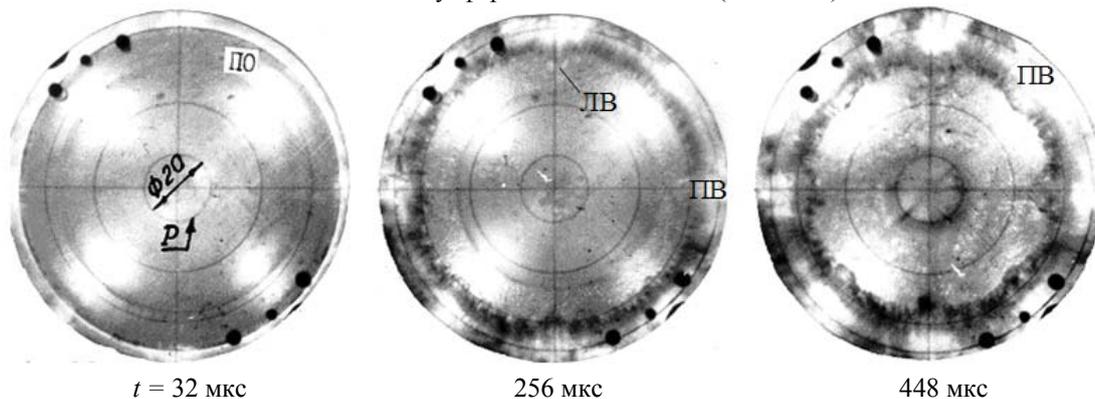
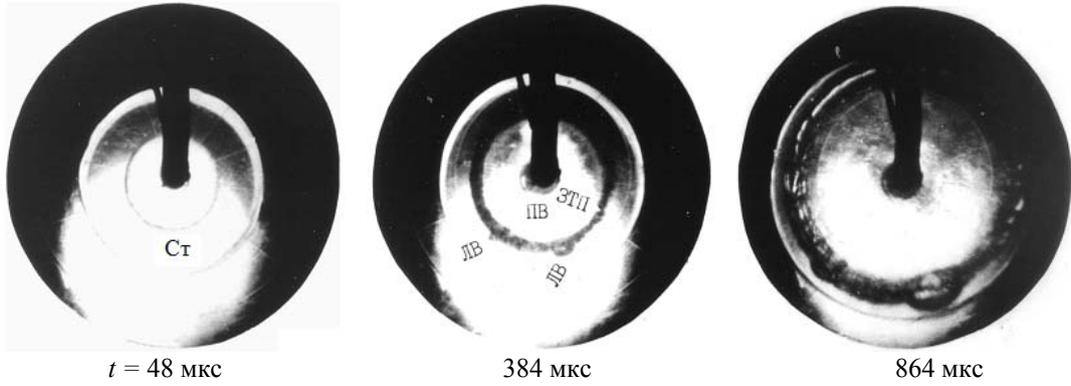


Рис. 4. Развитие локального возмущения на поверхностях оболочек: Ст – оболочка из студня; ЛВ – локальное возмущение; ЗТП – зона турбулентного перемешивания в области, не занятой ЛВ; ПВ – продукты взрыва; ВО – вода; ПО – полусферическая оболочка; Р – реперная сетка; время  $t$  отсчитывается от момента подрыва ГВС (см. также с. 39)

Эксплозия цилиндрической оболочки (опыт 958)



Эксплозия полусферической оболочки (опыт 295)

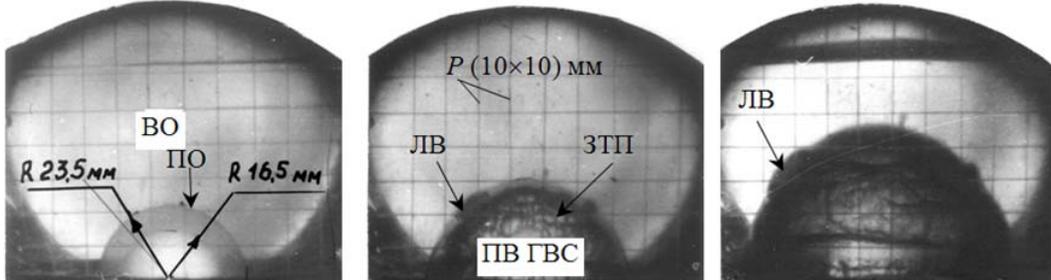
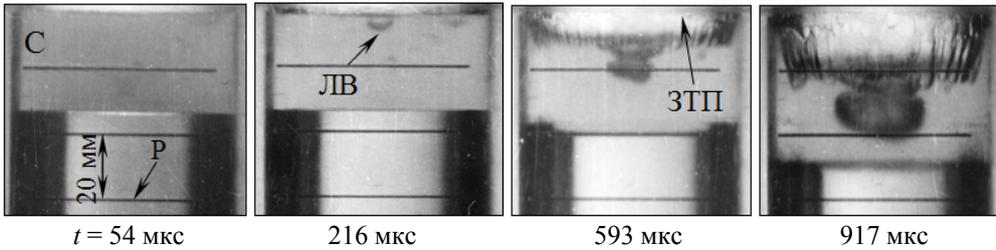


Рис. 4. Окончание

Локальное возмущение, образовавшееся при интерференции УВ (опыт 904)



Локальное возмущение диаметром 2,5 и глубиной 3 мм (опыт 644)

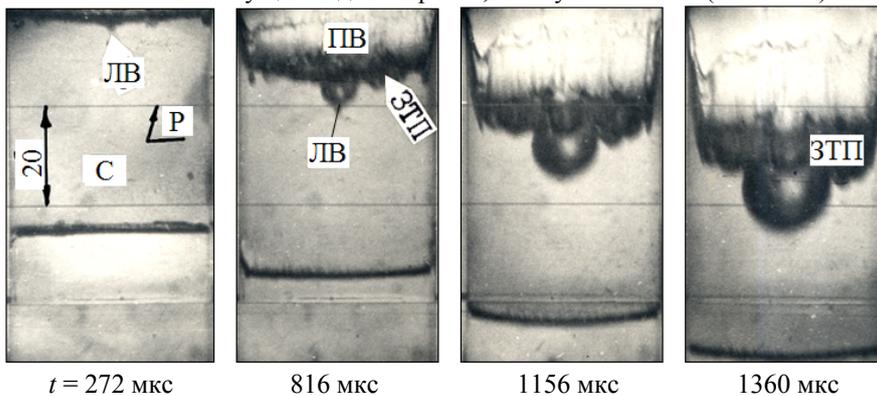


Рис. 5. Кинограммы развития локальных возмущений на плоской контактной границе: С – слой студня; ПВ – продукты взрыва газовой взрывчатой смеси; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; ЛВ – локальное возмущение; Р – репер; время  $t$  отсчитывается от момента подрыва ГВС

цилиндрической и полусферической оболочек. На рис. 5 представлены кинограммы развития ЛВ на плоской контактной границе. По кинограммам видно, что на неустойчивых поверхностях обо-

лочек и плоского слоя совместно с зоной турбулентного перемешивания (ЗТП) развивается и ЛВ в виде пузыря, который опережает фронт зоны.

На рис. 6 приведена  $X(t)$ -диаграмма течения для плоского случая, на рис. 7 –  $R(t)$ -диаграммы для цилиндрических и полусферических оболочек. Положение радиуса контактной поверхности студень-ПВ оболочки ( $R_{КГ}$ ) определялось по радиусу устойчивой поверхности из условия постоянства объема оболочки. Погрешность измерений  $R_i$  и  $X_i$  составляла  $\pm 0,5$  мм. На рис. 8 и 9 представлены

зависимости глубины проникновения полюса пузыря ЛВ  $h_{ЛВ}$  в студень от смещения  $2S$  контактной границы в интегральных переменных  $\sqrt{h_{ЛВ}}(\sqrt{2S})$ , где  $\sqrt{2S} \approx \int \sqrt{g} dt$ , а  $\beta_{ЛВ} = \left( \frac{\Delta \sqrt{h_{ЛВ}}}{\Delta \sqrt{2S}} \right)^2$  (здесь  $A \approx 1$ ), погрешность  $\beta_{ЛВ} \leq 15\%$ .

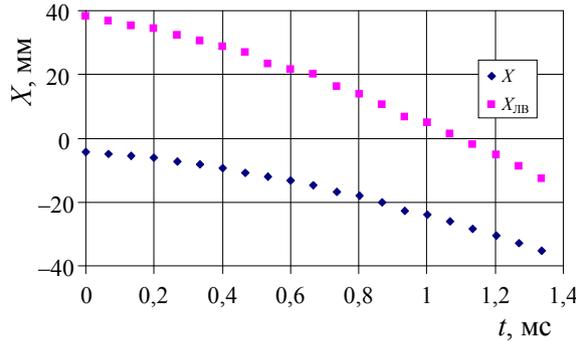
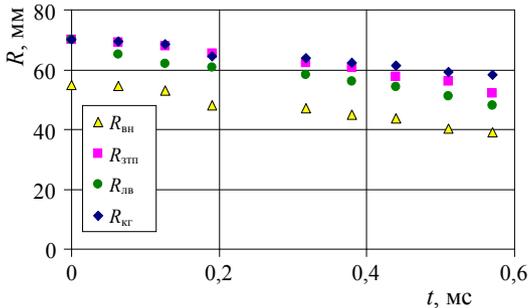
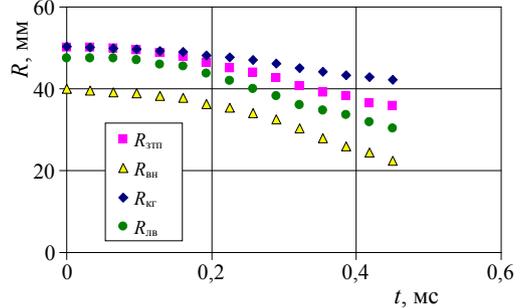


Рис. 6.  $X(t)$ -диаграмма течения при ускорении плоского слоя (опыт 644):  $X$  – устойчивая граница,  $X_{ЛВ}$  – проникновение полюса локального возмущения в студень

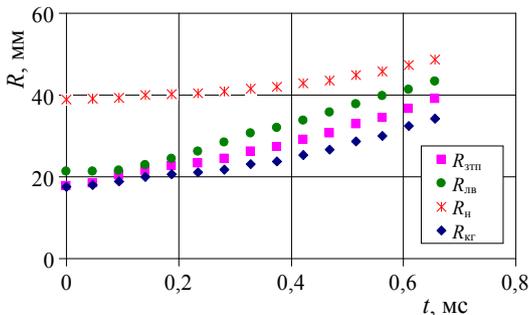
Имплозия цилиндрической оболочки (опыт 646)



Имплозия полусферической оболочки (опыт 377)



Эксплозия цилиндрической оболочки (опыт 958)



Эксплозия полусферической оболочки (опыт 295)

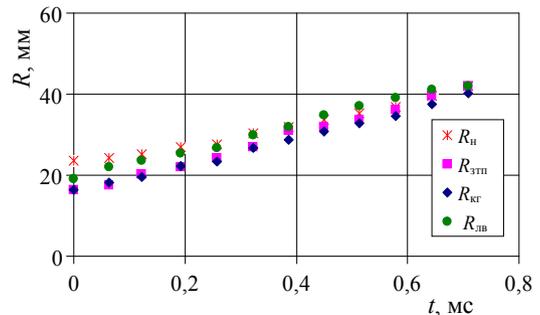


Рис. 7.  $R(t)$ -диаграммы течения при имплозии и эксплозии оболочек:  $R_n$  – наружный радиус;  $R_{вн}$  – внутренний радиус;  $R_{КГ}$  – радиус контактной границы;  $R_{ЛВ}$  – радиус проникновения полюса локального возмущения;  $R_{зтп}$  – радиус зоны ТП

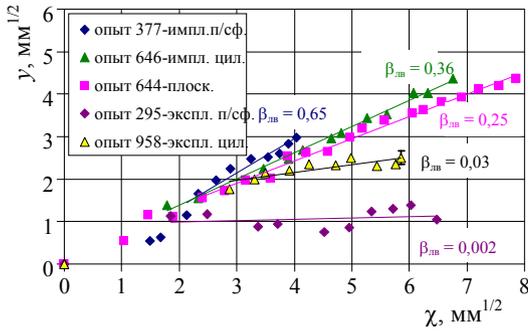


Рис. 8. Проникновение ЛВ диаметром 2,5 и глубиной 3 мм в жидкость на цилиндрической, полусферической и плоской контактных границах:  $\chi = \sqrt{2S}$ ,  $y = \sqrt{h_{ЛВ}}$

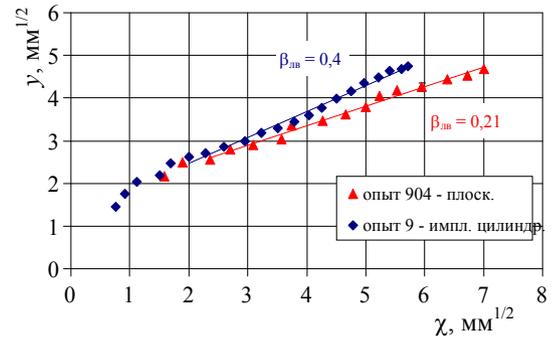


Рис. 9. Проникновение в жидкость локального возмущения, образованного при интерференции УВ, на сходящейся цилиндрической и плоской контактных границах:  $\chi = \sqrt{2S}$ ,  $y = \sqrt{h_{ЛВ}}$

По кинограммам и графикам видно, что:

а) на плоской контактной границе пузырь локального возмущения растет в жидкость примерно симметрично по глубине и по диаметру;

б) при имплозии цилиндрических и полусферических оболочек ЛВ в процессе развития приобретает также форму пузыря, но пузырь более интенсивно растет по глубине (в радиальном направлении), чем по своему диаметру, при эксплозии оболочек картина противоположная;

в) скорость проникновения полюса ЛВ в ступень ( $\beta_{ЛВ}$ ) при имплозии цилиндрической оболочки составляет  $\beta_{ЛВ} = 0,36 \div 0,4$ , при имплозии полусферической –  $\beta_{ЛВ} = 0,65$ ; при эксплозии цилиндрической –  $\beta_{ЛВ} = 0,03$ , при эксплозии полусферической –  $\beta_{ЛВ} = 0,002$ , на плоской контактной границе  $\beta_{ЛВ} = 0,21 \div 0,25$  (см. рис. 8 и 9); т. е. при имплозии  $\beta_{ЛВ}$  выше, а при эксплозии ниже по сравнению с плоским случаем.

Такой характер развития ЛВ связан с геометрией течения: деформация оболочки и изменение площади поверхности КГ приводят к изменению длины волны возмущения и амплитуды, что изменяет его скорость роста. Поэтому при сжатии сферических мишеней ИТС локальные возмущения могут очень быстро прорывать оболочки и нарушать симметрию течения.

### Заключение

Радиальная скорость проникновения локального возмущения в жидкость зависит от геометрии основного течения: на наружных поверхностях

сходящихся цилиндрических и сферических оболочек она выше, а на внутренних поверхностях расходящихся оболочек – ниже по сравнению со скоростью на плоской контактной границе.

### 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. Vol. A201. P. 192.
2. Meshkov E. E., Nevmerzhitsky N. V. et al. Jelly technique applications in evolution study of hydrodynamic instabilities on unstable plane and cylindrical surfaces. The Proc. of the 5<sup>th</sup> IWPCMT. Stony Brook, USA, 1995. P. 243–250.
3. Сотсков Е. А., Невмержицкий Н. В., Мешков Е. Е. и др. Исследование развития локального возмущения и его взаимодействия с зоной турбулентного перемешивания на границе газ-студень // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 2003. Вып. 1–2. С. 57–59.
4. Невмержицкий Н. В., Сотсков Е. А., Сеньковский Е. Д. и др. Развитие локального возмущения на границе газ-жидкость при неустойчивости Рэлея–Тейлора // Труды Международной конференции «XIII Харитоновские тематические научные чтения» Россия, Саров, 2011 г. С. 587–591.
5. Гаранин С. Ф. Автомодельное развитие неустойчивости Рэлея–Тейлора в районе угловых точек // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1994/1995. Вып. 3/1. С. 12–17.

Статья поступила в редакцию 21.04.2014