

## РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛЕТА ПЛОСКОГО УДАРНИКА

*В.П. Башурин, Л.В. Ктиторов, А.С. Лазарева*

АО ИТЦ "Система Саров", Технопарк Саров, пос. Сатис, Россия

### Введение

Численные исследования, представленные в этой работе, сопровождают лабораторные эксперименты по изучению воздействия ударной волны на плоский водяной слой. В ранней постановке [1] нестационарная затухающая ударная волна создавалась при испарении тонкой (10 мкм) мишени, расположенной в слое воды толщиной 1 мм, воздействием короткого мощного лазерного импульса. В работах [2-3] исследователями ставилась задача создания дешевой и компактной установки, обеспечивающей разгон тонкой пластины до скорости порядка 250 метров в секунду с ее последующим симметричным ударом о слой воды. Установку планируется использовать для исследования неустойчивости свободной границы конденсированной среды при выходе на нее ударной волны. В этом случае пластинка толщиной около 1 мм и диаметром 35 мм разгоняется в канале ударной трубы до скоростей порядка 300 м/с давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом (рис. 1). Именно эта задача будет рассматриваться в нашей работе.

Некоторые процессы, происходящие при разгоне пластинки и ее соударении со слоем воды, рассматривались в численных исследованиях ранее. В расчетах, проведенных с использованием программы MASTER Professional [4] авторами статьи [1], продемонстрировано, что при ударе пластинки снизу по слою воды толщиной 1 см в последнем формируется нестационарная затухающая ударная волна амплитудой 0,2 ГПа при выходе на свободную границу слоя. Этот расчет носил скорее иллюстративный характер, а его результат подтверждает известное соотношение [5] для амплитуды давления на ударной волне через плотность среды  $\rho_0$ , скорость звука  $c$  в ней и массовую скорость частиц среды  $U$ :

$$P = \frac{1}{2} \rho_0 c U$$

Для воды  $\rho_0 = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ,  $c = 1500 \text{ м/с}$ , скорость ударника в разных экспериментах меняется от 150 до 250 м/с. В случае, когда скорость ударника при подлете к слою воды равна 250 м/с, давление оценивается как

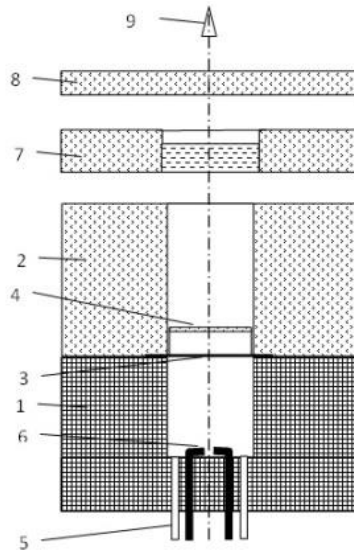
$$P = \frac{1}{2} 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} * 1500 \frac{\text{м}}{\text{с}} * 250 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 0.19 \text{ ГПа}$$

В дипломной работе Д.Е. Гука [3] приведены результаты расчетов динамики разгона ударника (тонкой горизонтальной пластинки) проведенные с использованием MASTER Professional. Рассмотрена одномерная задача с тонкой горизонтальной пластинкой, разгоняемой разностью давлений. Полученные в расчетах значения скорости пластинки при ударе близки к экспериментальным.

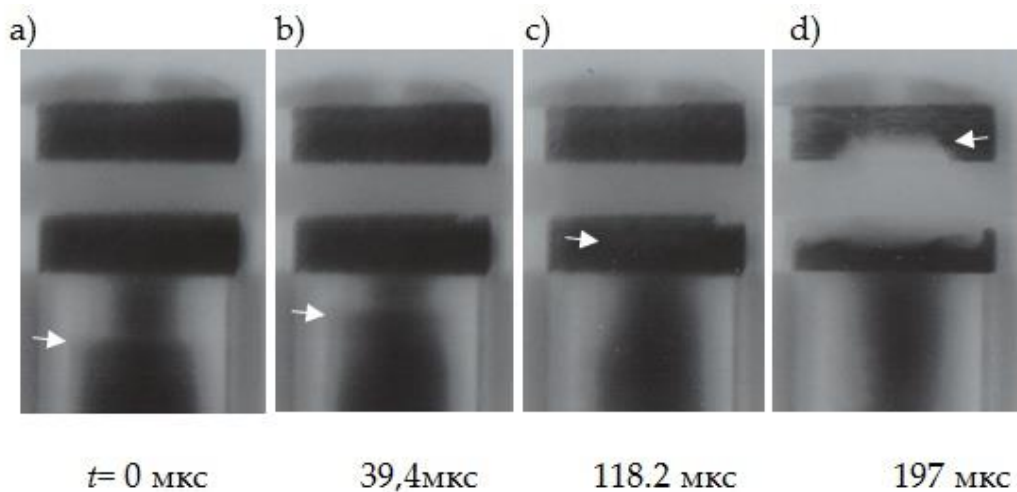
На текущем этапе экспериментальная методика позволяет исследовать симметрию удара лишь опосредованно - по форме разлетающегося облака капель, образовавшегося при диспергировании слоя воды [1-3]. Такой подход оказывается вполне корректным методологически, но дает лишь качественную оценку углу наклона пластинки при ее подлете к верхней стенке.

Для более подробного изучения процесса соударения пластинки со слоем воды было проведено численное изучение стабилизации полета ударника при его небольших начальных отклонениях от горизонтального положения, поскольку в рассматриваемой экспериментальной постановке именно одновременный подлет всей пластины к стенке будет иметь решающее значение. На результирующий угол наклона влияет распределение давления по поверхности пластины в начальный момент, связанное с начальным положением ударника, и точность

изготовления экспериментальной установки. Из-за недостаточно высокого разрешения камеры (рис. 2) в экспериментах [2] не удается измерить угол наклона ударника при его разгоне и вылете из ускорительного канала, однако по симметрии облака капель, образовавшегося при разлете воды, авторы заключают, что положение пластинки было близким к горизонтальному.



**Рисунок 1.** Схема ударной трубы. Обозначения: 1 – камера, заполняемая смесью ацетилена с кислородом, 2 – ускорительный канал; 3 – пленка; 4 – ударник с «юбочкой»; 5 - газопроводы; 6 - искровой разрядник; 7 – кювета со слоем воды, прикрытая снизу слоем скотча; 8 – защитное стекло; 9 – датчик PDV



**Рисунок 2.** Кадры фотохронограммы полета ударника (положение ударника в кадре отмечено стрелкой, направленной направо) и фронта облака диспергированной воды (стрелка налево). Время отсчитывается от кадра а). Расстояние между концом ускорительного канала и кюветой с водой 15 мм. Пластина бьет по слою воды толщиной 1 см, налитой в кювету ((7) на рис. 1); вода в кювете удерживается слоем скотча, которым отверстие в кювете снизу заклеено

Наблюдения показывают, что удар оказывается плоским даже в случаях, когда на кадрах фотохронограммы заметны отклонения от горизонтального положение в начале полета. Для описания полета ударника и установления причин его стабилизации были проведено численное исследование его разгона в ударной трубе с последующим вылетом из нее и полетом до верхней стенки.

## Расчеты

### I. Квазиодномерный расчет разгона горизонтальной пластинки разностью давлений

В первой серии расчетов исследовалась квазиодномерная задача разгона тонкой горизонтальной пластинки в канале разностью давлений с последующим вылетом пластинки из трубы и подлетом к верхней стенке. Расчеты проводились с использованием программного комплекса STAR-CCM+ (версия 8.02), предназначенного для решения задач механики сплошной среды [5]. Предполагается, что пластинка в полете не отклоняется от горизонтального положения. В расчетной модели описывается цилиндрическая труба, в которой происходит разгон ударника давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом (рис. 3). В начальный момент в нижней камере задается однородный газ при постоянном давлении.

На первом этапе исследовалась динамика горизонтальной пластинки массой около 3 грамм, которая разгоняется за счет разности давлений под и над ней (см. рис. 3).

$$S(P_1 - P_0) = m\ddot{x}, \quad (1)$$

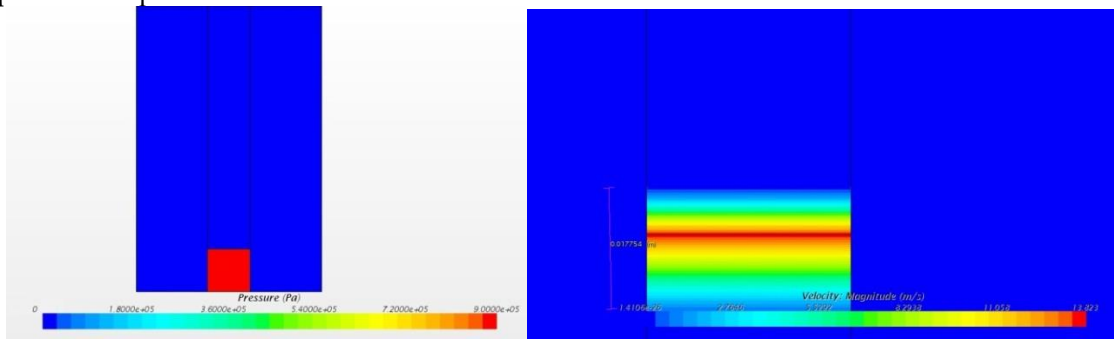
где  $x$  – вертикальная координата пластинки. Интегрирование уравнения (1) на отрезке от  $t^n$  до  $t^{n+1}$  ( $v^n$  – скорость на  $n$ -ом шаге):

$$v^{n+1} = v^n + \frac{S(P_1 - P_0)}{m} \Delta t$$

При этом предполагается, что газ расширяется адиабатически (подробная теория разгона снаряда продуктами горения в газовой пушке представлена в [6]):

$$P_1(t)/\rho_1(t)^\gamma = const$$

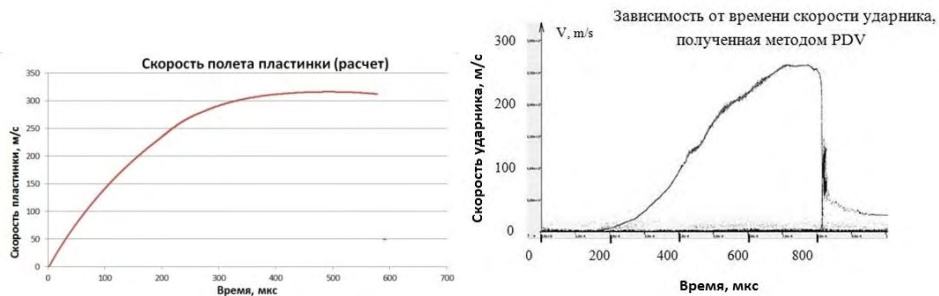
Сам процесс энерговыделения в описываемом расчете не моделировался. В расчетах использовались разные значения показателя адиабаты сгоревшей смеси ацетилена с кислородом в пределах 1.2 - 1.4. Начальные значения давления ( $10 \text{ атм} = 10^6 \text{ Па}$  на рис. 3) и температуры ( $1000^\circ \text{ K}$  на рис. 3) во всей нижней области подбираются из соображений равенства прироста внутренней энергии газа в области удельной теплоты сгорания ацетилена, используемого в лабораторном эксперименте.



**Рисунок 3.** а) Задание начального давления в ударной трубе (превышение давления в области над атмосферным); б) Волны возмущений, порождаемые движущимся поршнем, распространяются в нижнем и верхнем регионах с разными скоростями в начальный момент

Эти скорости в общем случае являются функциями давления и температуры в каждой из областей. Пройденные фронтом каждой из волн расстояния относятся как кв. корень из отношения температур  $c = \sqrt{\frac{\gamma p T}{m}}$

При корректном подборе параметров расчета (коэффициента адиабатического расширения, начального давления, температуры) численные результаты моделирования полета ударника совпадают с экспериментальными результатами, полученными методом PDV [3].



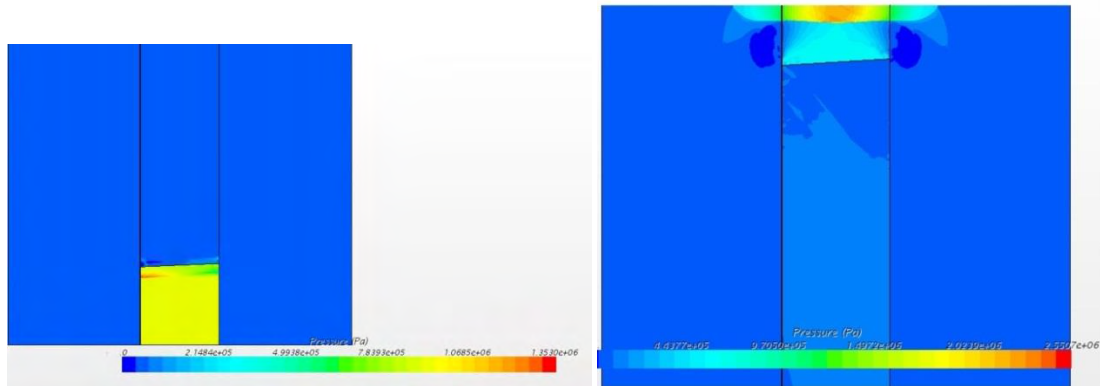
**Рисунок 4 а, б.** Зависимость скорости ударника  $V$  от времени  $t$ : а) в квазиодномерном расчете по STAR-CCM+; б) полученная в эксперименте методом PDV [3]

В экспериментальных работах [1, 2, 5] подчеркивается, что температура в несколько тысяч градусов и соответствующая ей высокая скорость звука порядка 1 км/с в области детонации позволяют разгонять тонкие ударники в цилиндрическом канале до высоких скоростей. Принципиально важным при этом является обеспечение симметрии полета и разгона ударника.

**II. Двумерный расчет разгона и стабилизации пластины, отклоненной в начальный момент от горизонтального положения**

Во второй серии расчетов рассматривался вопрос об устойчивости пластинки по отношению к угловым возмущениям. Решается задача, в которой давление в начальный момент распределено неоднородно, ударник при этом поворачивается в начальный момент на небольшой угол – от 0 до 10 градусов – по отношению к горизонтальному положению. Поворот задается либо навязыванием скорости поворота на небольшом начальном промежутке, либо происходит за счет неоднородного распределения давления в области. Длина пластинки отличается от ширины ударной трубы на 0.2 мм (по 0.1 мм с каждой стороны).

На рис. 5, а приведено распределение давления в газе на момент 0.0000062 сек в задаче, где на начальном промежутке длительностью 0.0000003 сек задавался поворот пластинки длиной 3 см с линейной скоростью 200 м/с.



**Рисунок 5.** Профиль давления а) сразу после задания начального поворота; б) после отражения ударной волны, идущей впереди ударника, от верхней стенки

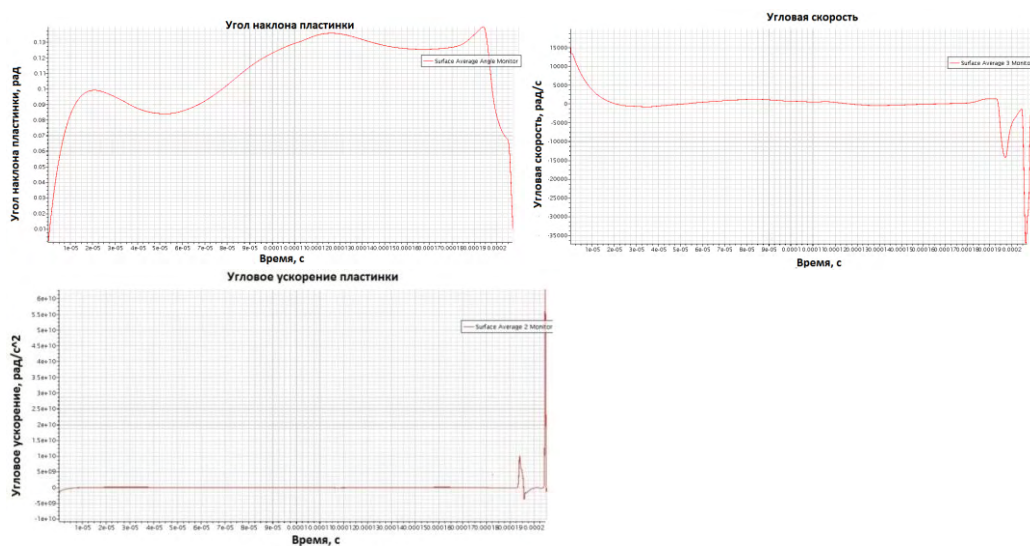
В дальнейшем пластинка движется под действием силы, получающейся интегрированием давления по поверхности (давление пересчитывается на единицу глубины в рассматриваемой двумерной постановке):

$$a_0 = \left( \int_{-l}^l P_p dl - \int_{-l}^l P_l dl \right) / m_0$$

Угловое ускорение находится как  $a_0 = \left( \int_{-l}^l P_p l dl - \int_{-l}^l P_l l dl \right) / I_0$ , где момент инерции  $I_0 = 1/12m(2l)^2$ .

Движение пластинки задается при помощи процедуры морфинга (morphing) сетки в STAR-CCM+ с навязанными скоростями движения границ каждой из расчетных областей. Синхронизация движения ударника с движением остальных границ достигается пересчетом скорости каждой точки каждой из границ по скорости самой пластинки, задаваемой динамикой газа.

Механизм стабилизации пластинки проиллюстрирован на рис. 5, б. Образовавшаяся перед пластинкой ударная волна налетает на стенку и, отразившись, двигается вниз. При взаимодействии отраженной и набегающей волн на том краю пластинки, который находится ближе к верхней стенке, образуется зона повышенного давления, поворачивающая ударник в направлении, противоположном отклонению. В результате при подлете пластинки к верхней стенке происходит практически полное возвращение пластинки в горизонтальное положение при задании начального отклонения в определенном диапазоне (рис. 6, а-в).



**Рисунок 6.** Динамика изменения: а) угла отклонения от горизонтали в радианах; б) угловой скорости пластинки в рад/сек; в) углового ускорения пластинки в рад/сек<sup>2</sup>

## Выводы и результаты

1. В разработанной в [2-3] лабораторной установке плоский ударник из оргстекла толщиной 1 мм (и диаметром 35 мм) разгоняется до скорости 275 м/с в цилиндрическом канале ударной трубы давлением продуктов детонации смеси ацетилена с кислородом. Ударник налетает на плоский слой воды толщиной в 1 см, симметрия удара в эксперименте оценивается визуально по форме облака капель, образующегося при диспергировании воды. Результаты двумерного численного моделирования указывают на возможность стабилизации ударника при его подлете к верхней стенке при условии, что возмущения носят регулярный характер (поворот пластинки без заметного искажения плоской формы) и угол начального отклонения невелик (до 10 градусов).

2. Стабилизация происходит за счет образования зон высокого и низкого давления перед ударником и за ним. Давление на ближнем к стенке краю пластинки будет выше давления на дальнем краю, поэтому результирующий суммарный момент будет направлен в сторону уменьшения угла отклонения пластинки и стабилизации ее полета.

3. Экспериментальная методика разгона плоского тонкого ударника с его последующим соударением с исследуемой средой (жидкой или твердой) может быть использована для исследования развития неустойчивости свободной границы исследуемого образца при выходе на нее ударной волны. Это может быть, в частности, исследование влияния эффектов вязкости и поверхностного натяжения на процесс формирования облака диспергированной жидкости и

размеры образовавшихся частиц. Для этого необходимо усовершенствовать существующую методику разгона так, чтобы в слое после удара возникла плоская ударная волна легко прогнозируемой интенсивности. Результаты численного моделирования, представленные в этой работе, указывают на то, что внутренние механизмы стабилизации полета способствуют выравниванию ударника, если разгон в канале происходит достаточно гладко. Последние усовершенствования методики в виде ниток, натянутых вдоль образующих канала, позволяют минимизировать контакт ударника со стенками [3].

*Рисунки 1, 2 и 4, б используются с любезного согласия авторов статьи [2].*

### Список литературы

1. Асташкин М.В., Баранов В.К., Георгиевская А.Б., Голубинский А.Г., Иреничев Д.А., Мешков Е.Е., Степушкин С.Н., Сяндюков А.Ю., Хатункин В.Ю. Неустойчивость свободной границы слоя воды, ускоряемой волной Тейлора. // Письма в ЖЭТФ, 2014, 99, №. 3, с. 165–168.
2. Баранов В.К., Георгиевская А.Б., Гук Д.Е., Замыслов Д.Н., Макаров С.А., Мешков Е.Е., Степушкин С.Н. Лабораторное компактное устройство для разгона тонких ударников. // Письма в ЖТФ, т.42, №16, 2016, с.1-6.
3. Гук Д.Е. Разработка лабораторного устройства для разгона тонкого ударника до скорости порядка 200 м/с: магистерская диссертация. СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, 2017.
4. Руденко В.В., Шабуров М.В., Чехунов Е.В. Учебно-исследовательский программный комплекс MASTER по физике сплошных сред. // Труды Региональной конференции по научному программному обеспечению, 2-3 февраля, 2006. Изд-во Политехнического университета, С.-Петербург (2006), с. 121.
5. Jones A. H., Isbell W. M., Maiden C. J. Measurement Of The Very-High-Pressure Properties Of Materials Using A Light-Gas Gun. // J. Appl. Phys. 37, 3493 (1966).
6. A. E. Seigel, Agardograph 91, U. S. Naval Ordnance Laboratory Silver Spring, Md. (1965).
7. CD-ADAPCO, STAR-CCM+ Version 8.02 User Guide (2013).

## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕГМЕНТНЫХ ОБЛИЦОВОК КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

*П.В.Круглов*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Известно, что для проникания в твердые преграды используются кумулятивные заряды, формирующие «ударное ядро». В основе действия такого кумулятивного заряда лежит взаимодействие высокоскоростного компактного элемента, представляющего собой метаемую взрывчатым веществом металлическую сегментную облицовку, с преградой. В конструкции заряда такая облицовка имеет, как правило, сегментную форму, изготавливается из стали, меди, тантала [1,2]. После инициирования шашки взрывчатого вещества облицовка обжимается и приобретает вид удлинённого тела. Для стабилизации ее полета рекомендуется формирование в хвостовой области аэродинамической юбки, имеющей переменный по толщине периодический, многовершинный профиль поперечного сечения. Создание такого профиля «ударного ядра» возможно различными способами, использующими модификации как облицовки [3], так и заряда взрывчатого вещества. Исследования показывают [4], что при модификации облицовки высота таких вершин по ее толщине в окружном направлении должна быть невелика, и в области