

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В СТВОЛЕ ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ**Козак Т. Н.**

Представлен анализ одного из параметров внутренней баллистики гидропушки – давления, а так же методов его измерения. При формировании гидроструи в пороховой гидропушке наблюдается характерное распределение давления жидкости по длине ствола. Максимальной величины давление достигает при входе в профилированное сопло. Наиболее перспективным методом измерения давления в стволе гидропушки является метод измерения с помощью датчиков, работающих на пьезоэффекте. Характеристики датчиков на основе полимерной пленки делают их незаменимыми при измерении быстропротекающих процессов взрыва и необходимо проведение дополнительных исследований, результаты которых будут учитываться при разработке нового измерительного оборудования.

Представлено аналіз одного з параметрів внутрішньої балістики гідрогармати – тиску, а також методів його вимірювання. При формуванні гідроструменя в пороховій гідрогарматі спостерігається характерний розподіл тиску рідини вздовж ствола. Максимальної величини тиск досягає при вході в профільоване сопло. Найперспективнішим методом вимірювання тиску в стволі гідрогармати є метод вимірювання за допомогою датчиків, що працюють на п'єзоефекті. Характеристики датчиків на основі полімерної плівки роблять їх незамінними при вимірюванні швидкоплинних процесів вибуху і необхідне проведення додаткових досліджень, результати яких будуть враховуватися при розробці нового вимірювального обладнання.

This work describes the analysis of one of the parameters of the internal ballistics of a water gun – pressure, as well as the methods of its measuring. While forming a water jet in a gunpowder water gun, a differential distribution of liquid pressure along the length of a barrel can be observed. The pressure achieves its peak magnitude while entering a shaped nozzle. The most perspective method of pressure measuring in a barrel of a water gun is a piezoelectric-sensing technology. Characteristics of sensors based on polymer film makes them indispensable in the measurement of fast processes of explosion and it is necessary to conduct additional studies when developing a new measuring equipment.

Козак Т. Н.

ведущий инженер НИПКИ «Искра»
official@iskra.lugansk.ua

УДК 532.57; 623.5.

Козак Т. Н.

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В СТВОЛЕ ПОРОХОВОЙ ГИДРОПУШКИ

Гуманитарное разминирование (обезвреживание взрывоопасных предметов (ВОП) и невзорвавшихся боеприпасов (НВБ) в гражданских целях) отличается от военного разминирования. К гуманитарному разминированию предъявляются более жесткие требования по безопасности выполняемых работ и степени очистки территорий, а так же защиты окружающей среды от вредных выбросов. Эффективность и безопасность гуманитарного разминирования зависит от применяемого оборудования для поиска и обезвреживания ВОП и от технологий очистки. Методы обезвреживания и применяемое при этом оборудование подробно рассмотрены в отчете НИПКИ «Искра» [1].

Одним из перспективных методов обезвреживания ВОП является гидродинамический метод. Суть этого метода заключается в следующем. Струя жидкости, двигаясь со скоростью 300...1000 м/с, пробивает корпус ВОП, разрушает монолит взрывчатого вещества, разрушает и разбрасывает корпус ВОП вместе с взрывчатым веществом.

Формирование струи производится с помощью специальных гидродинамических устройств, а методы получения струи основаны на разных физических принципах. В работе [2] показаны преимущества гидроимпульсного метода, который реализуется в импульсном водомете и гидропушке (ГП). Давление струи на срезе сопла импульсного водомета равно давлению жидкости в его стволе. Особенностью ГП является то, что ее коэффициент превышения давления (k_p), который равен отношению динамического напора струи к давлению в стволе, может достигать величины 3,6. Это позволяет получать скорость струи свыше 2000 м/с при динамическом напоре 30–35 ГПа [3]. При исследованиях внутренней баллистики ГП контролируемые параметрами являются давление жидкости в стволе и скорость истечения (скорость головы струи).

Задачей данной работы является анализ одного из параметров внутренней баллистики ГП-давления, а так же методов его измерения.

На рис. 1 показана схема пороховой ГП безударного и ударного действия. В безударной ГП (см. рис. 1, а) под действием пороховых газов в ресивере поршень разгоняется в стволе вместе с водой. В ГП ударного действия (см. рис. 1, б) вода находится у входа в сопло и по ней ударяет уже разогнавшийся поршень.

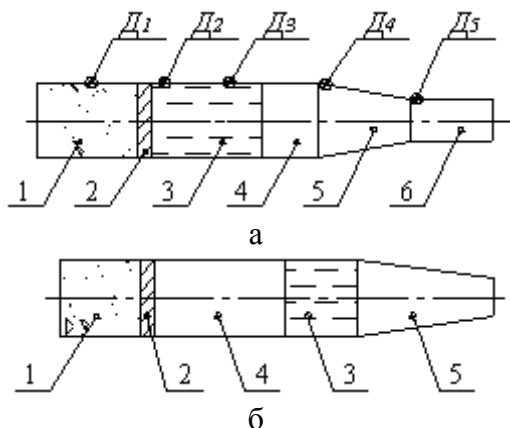


Рис. 1. Схема гидропушки безударного действия (а) и ударного действия (б):

1 – ресивер; 2 – поршень; 3 – вода; 4 – ствол; 5 – сопло; 6 – коллиматор; $Д_1 ÷ Д_5$ – датчики давления

Процессы, происходящие в стволе ГП, начинаются с воспламенения пороха. Выделяющиеся в результате горения пороха пороховые газы разгоняют водяной заряд в цилиндрической части ствола ГП. При втекании в сопло, жидкость ускоряется и с большой скоростью истекает через коллиматор, который служит для выравнивания скорости и стабилизации струи.

Для решения практических задач создается теоретическая модель процесса в стволе ГП и решается совместная задача о горении пороха, движении газопороховой смеси, течении воды и воздуха. Полная модель достаточно сложная. Задачу можно упростить, если ввести некоторые допущения: воду считать идеальной жидкостью, пренебрегая ее вязкостью и теплопроводностью; течение жидкости – изэнтропическим с истечением в вакуум; порох находится в замкнутой адиабатной оболочке, воспламенение пороха происходит мгновенно и горит он параллельными слоями [2]. Основным и универсальным методом расчета течений газовой динамики является численный метод. Анализ применяемых численных методов приведен в работе [4].

Экспериментальные исследования, которые проводились с целью уточнения расчетной методики и для проверки адекватности математической модели процессов, происходящих в реальной ГП, представлены в работе [5]. На рис. 2 показаны расчетные (а) и экспериментальные (б) графики зависимости давления от времени для разных точек, распределенных по длине ствола. Кривые на графике нумеруются цифрами, обозначающими номер датчика давления (Д1–Д5), схема установки датчиков показана на рис. 1, а.

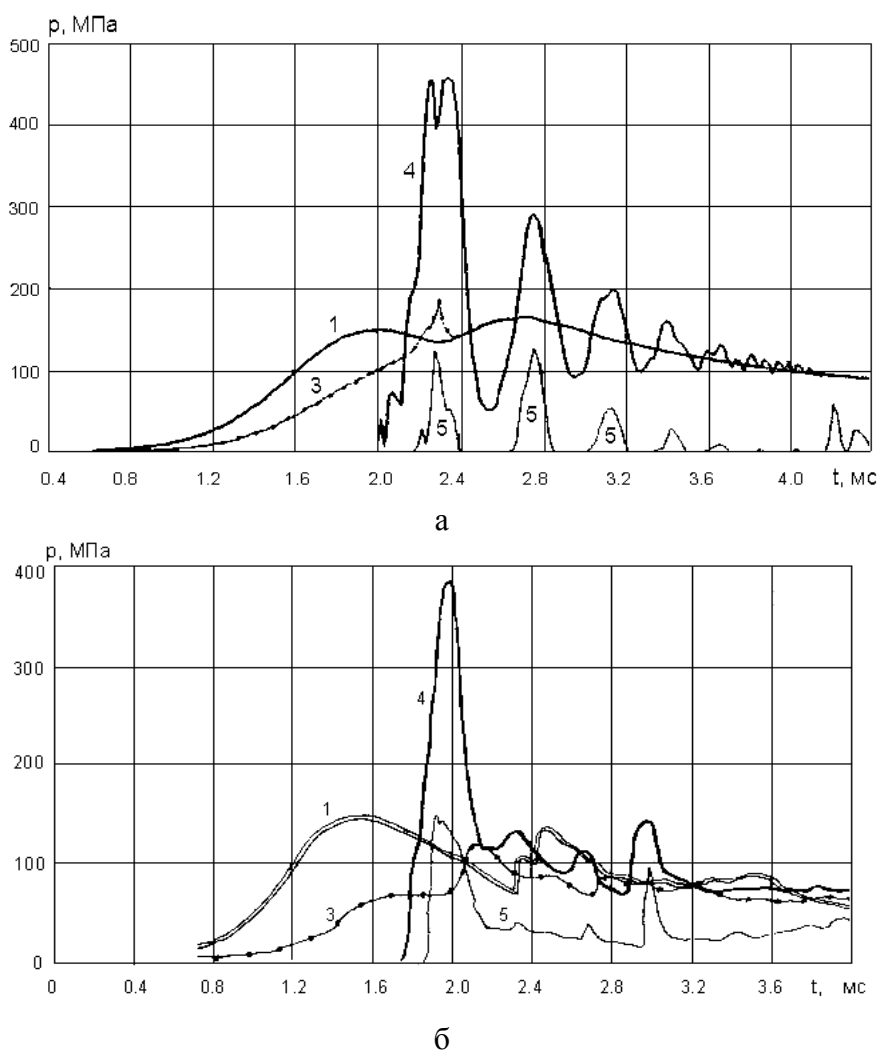


Рис. 2. Графики зависимости давления от времени в разных точках ствола

Графики представляют характерную картину распределения давления внутри ствола ГП в зависимости от времени. Кривая 1 показывает скачок давления, характерный для всех пороховых ГП. Это давление пороховых газов в ресивере после детонации взрывчатого вещества. Затем начинается движение столба жидкости, и давление на датчике Д1 уменьшается.

Максимальный скачок давления наблюдается при втекании жидкости в сужающееся сопло (кривая 4). При соударении струи жидкости с сужающимся соплом в жидкости возникает радиальное течение, которое направлено к оси ГП, что приводит к локальному повышению давления. От зоны повышенного давления в противоположные стороны распространяются волны сжатия. Эти волны ускоряют передние частицы жидкости, которые находятся вблизи свободной поверхности и тормозят задние частицы. Таким образом, происходит перераспределение энергии в потоке жидкости (передние частицы жидкости имеют большую удельную кинетическую энергию), что вызывает пульсации скорости истечения импульсной струи. В результате струя истекает прерывисто (кривая 5), и скорость истечения значительно превышает скорость втекающего в сопло столба жидкости.

Многочисленные эксперименты, проводимые с ГП различных параметров, показали аналогичный характер распределения давления и скорости в стволах. Так, в работе [6] показан результат эксперимента, проводимого с пороховой ГП (параметры см. табл. 1 п. 2). Водяной заряд разгоняется вначале в цилиндрическом стволе (до скорости 300...500 м/с). Затем, при втекании в профилированное сужающееся сопло, происходит возрастание давления (см. рис. 3 кривая 1). Скачкообразное увеличение скорости (кривая 2) начинается так же с момента втекания жидкости в сопло (начало координат «0» находится именно в этой точке). Поэтому размеры и форма сопла существенно влияют на параметры выстрела.

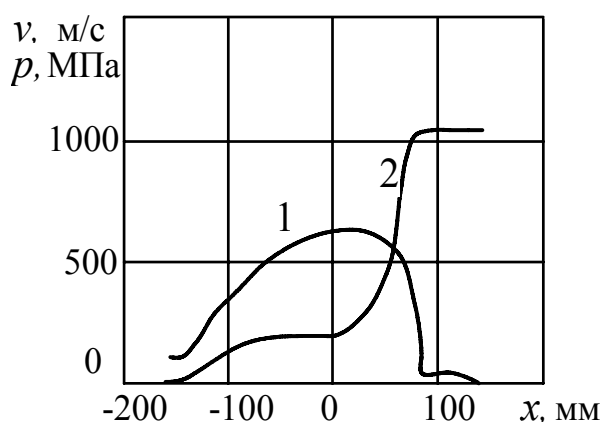


Рис. 3. Распределение давления (1) и скорости (2) вдоль оси гидропушки

Анализ результатов экспериментальных исследований по определению параметров внутренней баллистики ГП представлен в работе [7] (см. табл. 1). Максимальное давление воды в стволе ГП достигает величины порядка 1100–1200 МПа.

Параметры процесса детонации измеряются измерительными преобразователями. Преобразователи давления, применяемые для измерения быстропротекающих процессов, делятся по принципу действия на деформационные (с упругим чувствительным элементом в виде трубки, мембраны, сильфона) и электрические (емкостные, пьезорезисторные и тензорезисторные).

Для измерения импульсных мегабарных давлений (гидродинамический метод обезвреживания ВОП) в основном применяются электрические преобразователи. При измерении параметров внутренней баллистики, в частности давления в стволе ГП, измерительные приборы должны соответствовать определенным требованиям. Требования предъявляются в основном к первичным преобразователям (датчикам). Статическая характеристика датчика во

всем интервале измеряемых давлений должна иметь линейный характер. Собственная частота датчика должна превышать наибольшую частоту измеряемого сигнала в три раза. При измерении давления в ГП необходимо зарегистрировать импульс, близкий к прямоугольному, продолжительностью около 150 мкс, для этого собственная частота датчика должна быть не менее 40 кГц. К датчику предъявляются так же жесткие прочностные требования, так как на него действуют давления до 1 ГПа [2].

Таблица 1

Некоторые параметры выстрела ГП (получены экспериментально)

| № п/п | Параметры ГП | | | | Макс. давление воды, МПа | Макс. скорость истечения, м/с | Прим. | Исп. лит. |
|-------|--------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
| | Калибр, мм | Диаметр коллиматора, мм | Масса пороха, г | Масса водяного заряда, г | | | | |
| 1 | 40 | 20 | 100 | 400 | 800 | 1230 | | [8] |
| 2 | 32 | 15 | 30 | 230 | 600 | 1092 | | [6] |
| 3 | 40 | 20 | 100 | 500 | 1134 | 1555 | Сопло № 1 | [3] |
| | | | | | 850 | 1538 | Сопло № 2 | |
| | | | | | 760 | 1380 | Сопло № 3 | |
| 4 | 40 | 20 | 80 | 400 | 442 | 880 | | [4] |
| | | | 100 | | 1138 | 1254 | | |
| 5 | 40 | | 50 | 500 | 867 | 1490 | | [4] |
| | | | 75 | | 1024 | 1560 | | |
| | | | 100 | | 1120 | 1566 | | |

Этим требованиям соответствуют пьезоэлектрические и пьезорезистивные измерительные преобразователи, а так же тензодатчики.

Тензодатчики дают возможность определить как статические, так и динамические нагрузки, однако их эффективнее применять на более удаленном расстоянии от центра взрыва (например, измерение давления воздушной ударной волны), так как они имеют низкий уровень выходного сигнала и чувствительны к тепловым ударам.

Пьезоэлектрический эффект состоит в том, что под влиянием механических напряжений на гранях некоторых кристаллов появляются электрические заряды. При снятии усилий кристалл возвращается в не наэлектризованное состояние. В качестве материалов для датчиков применяются кварц, титанат бария, турмалин или искусственно выращенные кристаллы PiezoStar (фирма Kistler). Кварцевая пластина имеет высокую прочность, это позволяет прикладывать к ней большие измеряемые нагрузки. Уровень измеряемых давлений ограничен пределом упругости материала датчика (для кварца эта величина составляет 6 ГПа) [2].

Для измерения давления в стволе ГП можно использовать пьезоэлектрический датчик давления модели 118B03 производства PCB Piezotronics, который спроектирован для дульца патронной гильзы с измеряемым давлением до 861 МПа, время срабатывания ≤ 4 мкс [9]. Можно так же использовать пьезодатчики высокого давления фирмы Kistler с диапазоном измерений до 1000 МПа (тип 6211, 6213В [10]).

Пьезорезистивные датчики давления основаны на полупроводниковом эффекте – на полупроводниках изменяется электрическое сопротивление при действии на них механической нагрузки. В качестве материалов для пьезорезистивных датчиков применяют манганин, иттербий и др. Отличительная особенность пьезорезистивных датчиков – это прочность, стабильность показаний и устойчивость к перегрузкам. В ГосНИИ «Кристалл» (г. Дзержинск, Нижегородской области) [11] разработана методика определения импульсных давлений в диапазоне 2–50 ГПа с использованием манганиновых датчиков (МД). Сущность метода заключается в измерении относительного приращения сопротивления манганинового датчика под воздействием импульсного давления.

В настоящее время все чаще используются пленочные датчики. Так в институте физики взрыва РФЯЦ-ВНИИЭФ разработаны датчики на основе сегнетоэлектрического полимера поливинилиденфторида (ПВДФ). Поливинилиденфторид – это полукристаллический (примерно на 50 %) полимер. Материал становится пьезоэлектрическим и проявляет сегнетоэлектрические свойства после растяжения и воздействия медленно изменяющегося (0,01 Гц) сильного электрического поля. Его остаточная поляризация достигает ~ 10 мкКл/см, а пьезоэлектрический коэффициент ~ 22 пКл/Н. [12]. На сегодняшний день ПВДФ-датчики позволяют получить следующие характеристики: время срабатывания датчика ≤ 5 нс; диапазон измеряемых давлений от 0 до 34 ГПа; частота пропускания измерительного канала не менее 300 МГц. Конструктивно датчик имеет толщину – 20 мкм, размеры рабочей зоны колеблются от 2 до 100 мм² [13].

В работе [14] рассмотрена отработка состава ВВ и его воздействие на защитное ограждение (преграду). Один из измеряемых параметров – давление взрыва, которое измерялось пьезорезистивными датчиками с углеродистым резистором и пьезоэлектрическими датчиками с ПВДФ пленкой. Характеристики ПВДФ-датчика делают его идеальным для измерения высоких динамических давлений. Однако это довольно дорогостоящее оборудование, требующее осторожной сборки, быстро записывающей аппаратуры и высококачественных соединительных кабелей, чтобы снизить потери сигнала.

На рис. 4 изображен ПВДФ-датчик фирмы Ktech Corp. [14], который состоит из двух электродов (золотого и платинового). Поляризованная область (т. е. чувствительная площадка) замыкает электроды, и размеры ее варьируются от 1 мм² до 5 мм².

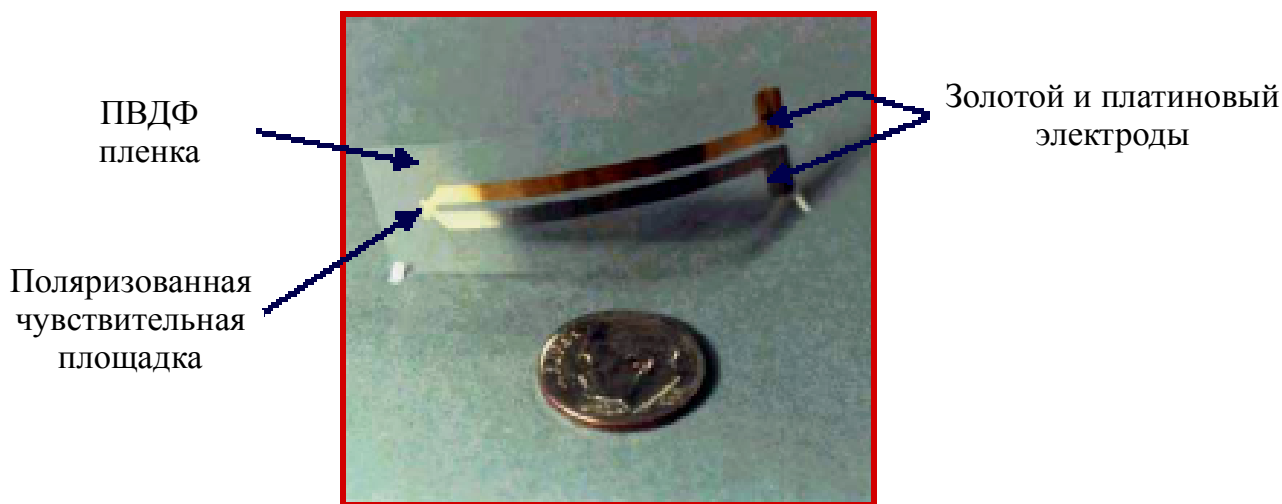


Рис. 4. ПВДФ-датчик фирмы Ktech Corp

В работе [15] исследовано воздействие высокоскоростной струи жидкости от дозвукового до сверхзвукового диапазона на твердую поверхность. При помощи ПВДФ-датчиков было измерено давление на твердую поверхность высокоскоростной струи ГП, истекающей со скоростью 2000–4500 м/с.

ВЫВОДЫ

Показано, что при формировании гидроструи в пороховой ГП имеется характерное распределение давления жидкости по длине ствола. Максимальной величины давление достигает при входе в профилированное сопло.

Наиболее перспективным методом измерения давления в стволе ГП является метод измерения с помощью датчиков, работающих на пьезоэффекте. В частности, характеристики датчиков на основе ПВДФ пленки делают их незаменимыми при измерении быстропротекающих процессов взрыва и необходимо проведение дополнительных исследований, результаты которых будут учитываться при разработке нового измерительного оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет о научно-исследовательской работе. Исследование теоретических основ приборного, технологического и методического обеспечения гуманитарного разминирования. Шифр И-01/06 / Министерство образования и науки Украины: НИПКИ «Искра»; № госрегистрации 0106Г001178.
2. Атанов Г. А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород / Г. А. Атанов. – К. : Вища школа, 1987. – 155 с.
3. Влияние формы сопла на параметры пороховой гидропушки / Г. А. Атанов, Э. С. Гескин, О. П. Петренко, А. Н. Семко // Прикладная гидромеханика. – 2007. – Т. 9, № 4. – С. 3–9.
4. Семко А. Н. Импульсные струи жидкости высокого давления / А. Н. Семко. – Донецк : ВЕБЕР, 2007. – 148 с.
5. Бигвава В. А. Особенности применения гидропушек для обезвреживания взрывоопасных предметов / В. А. Бигвава, А. В. Кочергин, Г. Л. Логунова // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2008 – № 4. – С. 24–29.
6. Атанов Г. А. Силы, действующие при выстреле гидропушки / Г. А. Атанов, Э. С. Гескин, А. Н. Семко // Вісник Донецького університету. – 2004. – Вип. 1. – С. 237–242.
7. Анализ параметров внутренней баллистики пороховой гидропушки / Т. Н. Козак. – НИПКИ «Искра» : Луганск, 2009. – 6 с. – Библиогр. : 10 назв. – Рус. – Деп. в ГНТБ Украины 20.07.09, № 57; Ук. 2009.
8. Семко А. Н. Внутренняя баллистика порохового водомета и гидропушки // Теорет. и прикл. механика. – Харьков : Основа, 2002. – Вып. 35. – С. 181–185.
9. Сайт «PCB piezotronics». Датчики PCB piezotronics (пьезоэлектрические, для измерения динамического давления) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Pressure/products/Manuals/118B03.pdf.
10. Официальный сайт фирмы Kistler Group. Датчики высокого давления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.intertechnology.com/Kistler/pdfs/Pressure.
11. Сайт ФГУП «ГосНИИ «Кристалл». Методика определения импульсных давлений с использованием манганиновых датчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.niikristall.ru/index.php?id-page=150.
12. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель, С. В. Разоренов, Л. В. Уткин, В. Е. Фортков. – М. : Янус-К, 1996. – 408 с.
13. Исследование фазовых превращений в железе и церию ПВДФ-датчиком давления: материалы международной конференции «Ударные волны в конденсированных средах»: Санкт-Петербург, 3–8 сентября 2006 г. / В. Г. Симаков, В. А. Борисенок, В. А. Брагунец, В. А. Волгин, М. В. Жерноклетов.
14. Guillermo C. O. Silva. Development, characterization and Application of a reactive bulking Agent for wall control / C. O. Guillermo. – Ontario: Queen's University, Kingston, 2007. – 370 p.
15. Hong-Hui Shi The measurement of impact pressure and solid surface response in liquid-solid impact up to hypersonic range: 8th International conference on erosion by liquid and solid impact / Shi Hong-Hui, K. Takayama; N. Nagayasu. – Cambridge, 1995. – P. 352–359.