

4. E.A. Kozlov et al., Local shear and spall fractures of steel shells under quasispherical explosive loading // Int. conf. "Shockwaves in condensed matter", Kiev, Ukraine, Proceedings, "Interpress" Ltd., 2012, p. 158-163.
5. A.R. Akhmetov, S.D. Khrenkov et al., LIU-2 and BIM accelerators as part of the RFNC-VNIITF X-ray imaging complex / 2014, p. 4, 15 (The report for the Russian conference on charged particles accelerators, October 2014, Obninsk)
6. A.R. Akhmetov, A.A. Kargin et al., BIM 234.3000M and LIU-2 as part of the X-ray imaging complex RGK-B1 / 2014, p. 1, 21 (The report for the XII International conference "Zababakhin scientific talks - 2014", June 2014, Snezhinsk).

ВЗРЫВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖИДКИХ СТРУЙ

В.А. Хворостенко¹, Н.В. Шикун¹, С.С. Меньшаков²

¹ФГУП «Красноармейский НИИ механизации», Красноармейск, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Высокоскоростные жидкие струи (рисунок 1) имеют широкое применение в различных областях науки и техники, некоторые направления которых можно проследить по рисункам 2 – 4, взятых из работ [1, 2]. При этом жидкие струи могут формироваться различными способами.

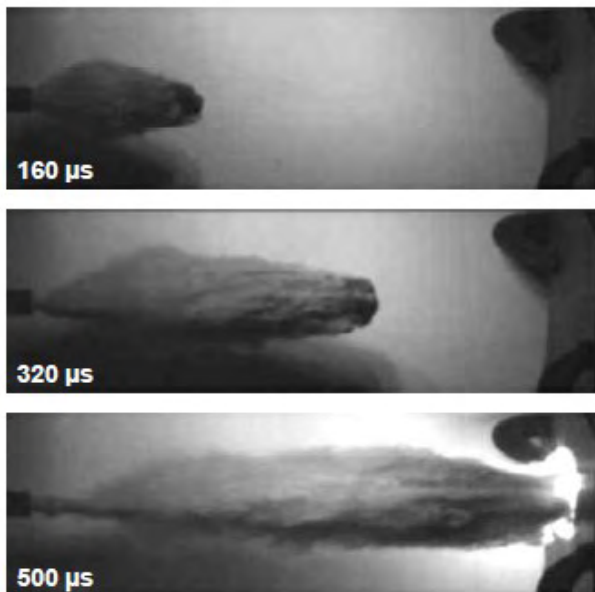


Рисунок 1. Изображения высокоскоростной жидкой струи в различные моменты времени



Рисунок 2. Прошивка трех, помещенных вместе 4.8-мм стальных пластин, водяным снарядом массой 240 г



Рисунок 3. Разрушение железобетонного блока толщиной 16 см с использованием водяного снаряда массой 230 г

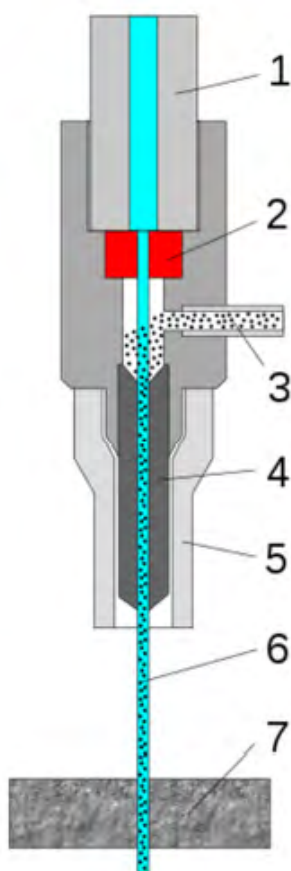


Рисунок 4. Типовая схема установки для гидроабразивной резки:
1 – подвод воды под высоким давлением; 2 – сопло;
3 – подача абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя; 7 – разрезаемый материал

С целью миниатюризации и создания компактных исполнительных устройств для формирования и разгона жидких струи до высоких скоростей могут использоваться взрывчатые вещества (ВВ). В этом случае представляет интерес исследование вопросов взаимодействия продуктов взрыва (ПВ) и жидкости, параметров формирующихся жидких струй и динамика их движения в воздухе.

В настоящей работе с помощью AUTODYN в простейшей постановке было проведено численное моделирование взрывного формирования в воздухе высокоскоростных жидких струй из сквозного цилиндрического отверстия диаметром 6 мм в стальной пластине толщиной 30 мм.

С одного торца отверстия располагался заряд ВВ с параметрами ТНТ, оставшуюся часть занимала жидкость (вода). В расчетах варьировались длины заряда и жидкости, при этом их массы не превышали 1 г, а свободная поверхность жидкости могла иметь разную форму – плоскую, выпуклую, кумулятивную выемку. Следовательно, при выбранных параметрах имеет место взрывное формирование жидких микроструй с высокой скоростью, что обеспечивает малую длительность взаимодействия микроструй с энергетическими материалами, если на практике такое может произойти.

Инициирование заряда осуществлялось по поверхности свободного торца.

В расчетах оценивалось влияние параметров заряда ВВ и жидкости на массово-скоростные характеристики формируемой микроструи.

Уравнение состояния жидкости задавалось в форме «Shock» с $P_{\min} = 0$.

В таблице 1 приведены некоторые из рассмотренных схем взрывного формирования высокоскоростных жидких струй, причем в первой из них в начальный момент времени (первый столбец) струя имела свободный плоский торец, что привело во времени к формированию пористой структуры жидкой струи (второй столбец в момент времени 61 мкс), образовавшейся вследствие действия растягивающих напряжений в жидкости (кавитации). Максимальная скорость головной части струи V_{\max} определялась по параметрам движения, рассчитываемых в подвижных маркерах, располагаемых в различных сечениях по оси жидкой струи и в данном варианте достигла значения 1181 м/с (третий столбец таблицы 1).

В дальнейших расчетах по данному варианту менялись длины заряда ВВ (длина увеличивалась) и столбика жидкости (длина уменьшалась), следовательно, изменялся и коэффициент нагрузки $\beta = M_{\text{ВВ}}/M$, где $M_{\text{ВВ}}$ и M массы заряда ВВ и жидкости соответственно. Результаты этих расчетов для $V_{\max}(\beta)$ приведены на рисунке 5, из которого видно, что при длине столбика жидкости 10 мм ($\beta = 2.44$), его максимальная скорость достигает значительной величины 2129 м/с.

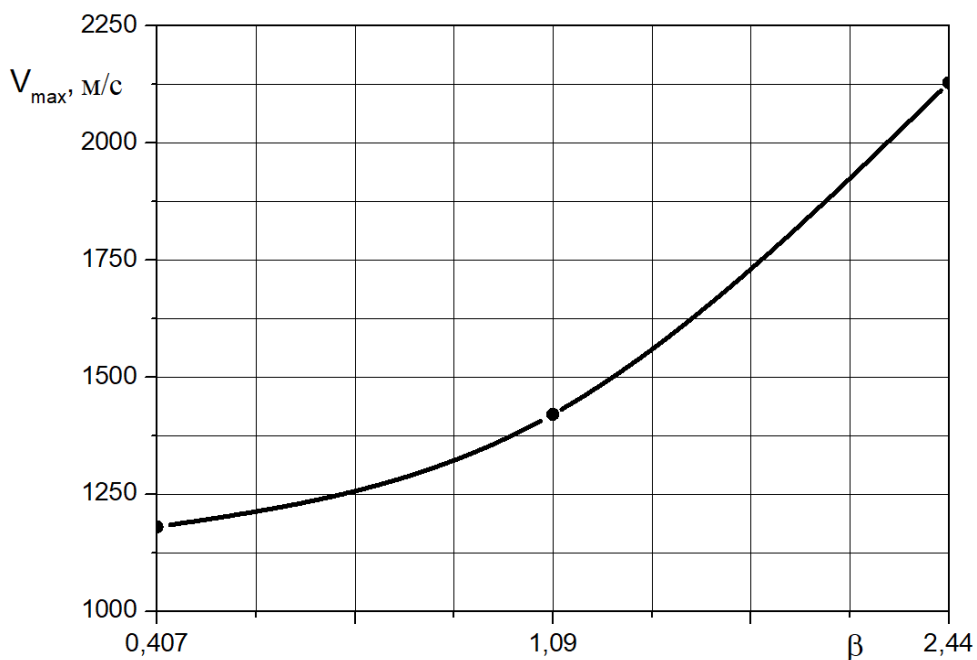
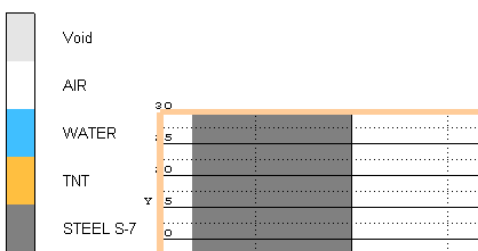
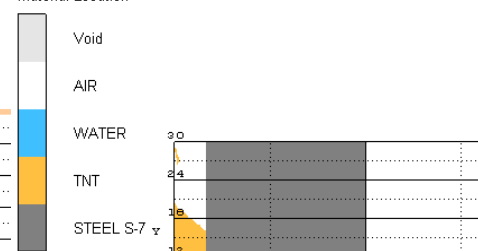
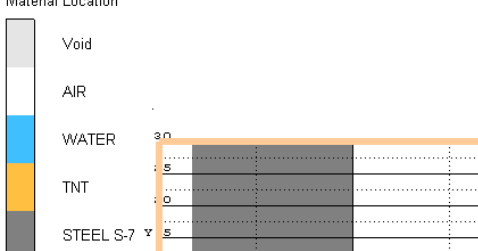
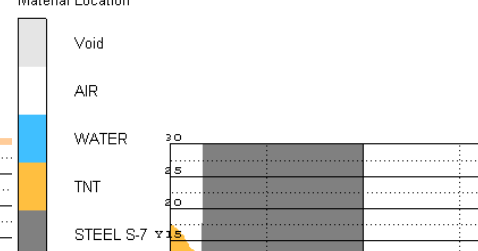
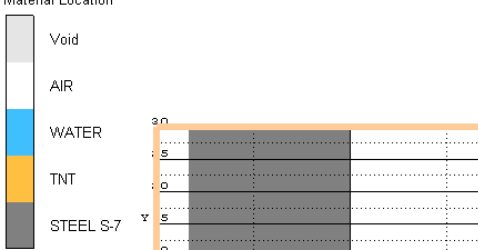
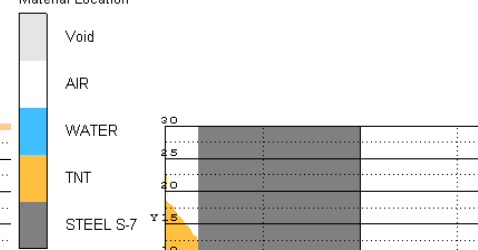


Рисунок 5. Изменение максимальной скорости V_{\max} головной части струи в зависимости от коэффициента нагрузки β

Таблица 1. Некоторые варианты рассмотренных схем взрывного формирования

Начальный момент времени	Текущий момент времени, мкс	V_{ma} $x, \text{M/C}$
<p>Material Location</p>  <p>var11 Cycle 0 Time 0.000E+000 μs Units mm, mg, μs Axial symmetry</p>	<p>Material Location</p>  <p>var11 Cycle 6646 Time 6.100E+001 μs Units mm, mg, μs Axial symmetry</p>	118
<p>Material Location</p>  <p>var11 Cycle 0 Time 0.000E+000 μs Units mm, mg, μs Axial symmetry</p>	<p>Material Location</p>  <p>var11 Cycle 1918 Time 2.003E+001 μs Units mm, mg, μs Axial symmetry</p>	103
<p>Material Location</p>  <p>var11 Cycle 0 Time 0.000E+000 μs Units mm, mg, μs Axial symmetry</p>	<p>Material Location</p>  <p>var11 Cycle 2511 Time 2.302E+001 μs Units mm, mg, μs Axial symmetry</p>	168

В варианте 2 (таблица 1) в начальный момент времени струя имела свободный торец в виде сферического сегмента высотой 1.5 мм, в результате чего при взрывном формировании такой струи ее головная часть испытывала пространственное расширение по всей поверхности сегмента, что привело к увеличению ее миделя, большому сопротивлению при движении в воздухе, и, соответственно, уменьшению максимальной скорости до значения ~ 1036 м/с (по сравнению со значением 1181 м/с для струи с плоским торцом).

Наконец, в последнем варианте (таблица 1) в начальный момент времени струя имела кумулятивную выемку в виде сферического сегмента высотой 1.5 мм, что привело в процессе взрывного формирования к образованию головной части жидкости в виде сплошного конуса, движущегося с максимальной скоростью в голове ~ 1688 м/с, в то время как остальная часть жидкой

струи имела пористую структуру и испытывала действие интенсивных растягивающих напряжений.

Таким образом, проведенные теоретические исследования показали, что даже небольшие по величине изменения в форме головной части (всего-то ± 1.5 мм в ту или иную сторону от плоского торца) могут привести к значительному изменению скорости движения жидкой микроструи, а значит, и к существенному изменению ее импульса.

Список литературы

1. ERNEST S. GESKIN, O. PETRENKO, V. SAMARDZIC, K. KLUZ Supersonic Liquid Projectiles: Novel Materials Processing Tool Proceedings of the 3rd IASME / WSEAS International Conference on CONTINUUM MECHANICS (CM'08). P. 172 – 179.

2. Анисимов П.Д., Колпаков В.И. Особенности математического моделирования гидро- и гидроабразивной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов // Молодежный научно-технический вестник. 2016, № 09. С. 1-11. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/848937.html>

3. А.А. Илюхина, В.И. Колпаков, А.Л. Галиновский, А.В. Хахалин. Особенности процесса гидроабразивной резки сотовых панелей космических аппаратов // Вестник Московского университета. СЕРИЯ 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2018, № 4. С. 101-107.

EXPLOSIVE FORMATION OF HIGH-SPEED LIQUID JETS

V.A. Hovorostenko¹, N.V. Shikunov¹, S.S. Menshakov²

¹ Federal State Unitary Enterprise “Krasnoarmeysky Research Institute of Mechanization”, Krasnoarmeysk, Moscow Region, Russia

² MSTU them. N.E. Bauman, Moscow, Russia

High-speed liquid jets (Figure 1) are widely used in various fields of science and technology, some areas of which can be traced in Figures 2-4, taken from [1 - 3]. In this case, liquid jets can be formed in various ways.

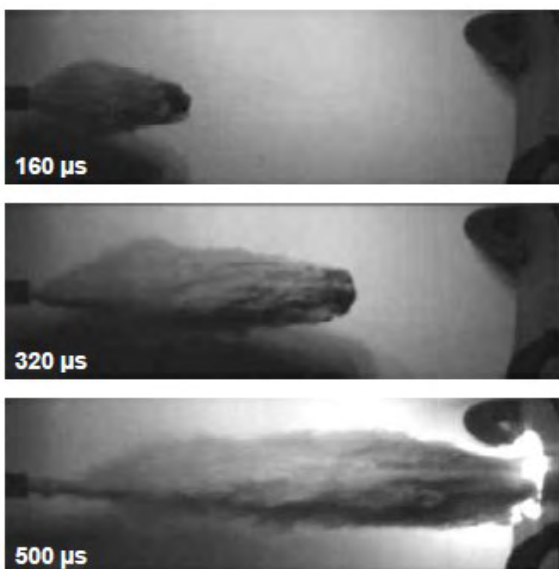


Figure 1. High-speed images liquid jet at various points in time

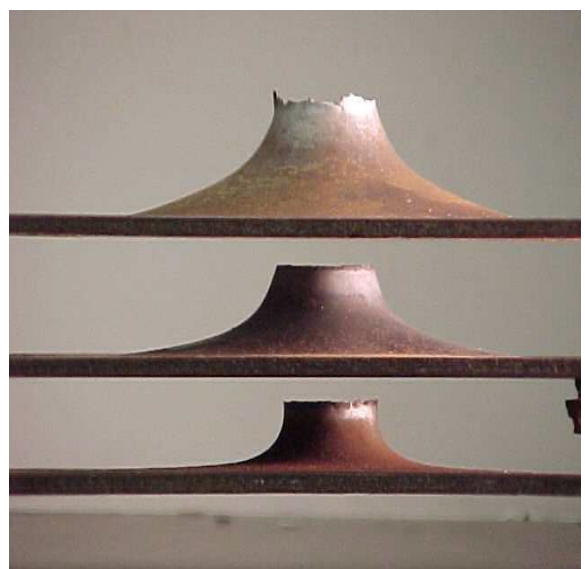


Figure 2. Firmware of three placed together 4.8 mm steel plates, water projectile weighing 240 g