

## Особенности физико-математической постановки и численного решения типовых задач гидроабразивной резки различных материалов

**77-48211/671120**

**# 01, январь 2014**

**Герасимова А. М., Ефимова С. А., Прохорова А. В., Колпаков В. И.**

УДК 519.6:532:539.5:621.9.04,011

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

[blakdragonn@rambler.ru](mailto:blakdragonn@rambler.ru)

[Sveti901@rambler.ru](mailto:Sveti901@rambler.ru)

[prohorova.anastacia2013@yandex.ru](mailto:prohorova.anastacia2013@yandex.ru)

Гидроабразивная резка – это вид обработки материалов резанием, где в качестве режущего инструмента используется струя жидкости или смесь жидкости и абразивного материала, движущаяся с высокой скоростью. Гидроабразивная резка является альтернативой не только механической, но и лазерной, плазменной, ультразвуковой обработкам материала, кроме того, в некоторых случаях она является единственно возможной.

Струя жидкости по своим техническим возможностям приближается к идеальному точечному инструменту, что позволяет обрабатывать сложный профиль с любым радиусом закругления. Поскольку ширина реза составляет 0,1 ... 3,0 мм, выход материала в стружку значительно меньше, чем при традиционных методах обработки. Линия разреза может быть любой кривизны, иметь острые углы и крутые повороты. Небольшая сила (1 ... 100 Н) и температура (+60 ... +90С) в зоне резания исключают деформацию заготовки, оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне. Струя не изменяет физико-механические свойства обрабатываемого материала.

Методом гидроабразивной резки возможно обработать с высокой точностью и производительностью самые твердые материалы, а также любые их сочетания. В связи с этим гидрорезка нашла применение в следующих областях промышленности: жилое и промышленное строительство – мозаика, плиты, плитка, твердая брусчатка, бетон, гипсовые блоки, изоляционные материалы, минеральные волокна, резка бетонных конструкций для их последующего демонтажа, расчистка швов; камнеобрабатывающая,

стеклянная промышленности; металлолистное производство; производство оборудования – шестерни, отливки, компоненты, сделанные из высококачественной стали, меди, алюминия, титана и коррозиестойчивых металлов; авиационная и аэрокосмическая промышленности – сплавы алюминия, титана, на хромо-никель-кобальтовой основе, а также композитные материалы, используемые для комплектующих самолетов, ракет и их двигателей; оборонная промышленность – утилизация устаревших образцов вооружений (разрезание корпусов ракет, боевой техники, судов и подводных лодок), разрезание корпусов снарядов и вымывание взрывчатых веществ; деревообрабатывающая промышленность – ламинированные деревянные панели, шпон, твердая древесина и многие другие [1].

К достоинствам гидроабразивной резки можно отнести также совместимость с промышленными роботами и манипуляторами, отсутствие выгорания легирующих элементов в легированных сталях и сплавах, отсутствие оплавления и пригорания материала на кромках обработанных деталей и в прилегающей зоне, полная пожаро- и взрывобезопасность процесса и экологическая чистота и полное отсутствие вредных газовыделений [2].

Важно отметить, что существует два идентичных вида обработки: гидрорезка (далее по тексту ГР) и гидроабразивная резка (ГАР). ГР и ГАР имеют минимальные отличия. В первом случае обработку материала обеспечивает жидкая струя. Во втором случае струя разгоняет частицы абразива, и уже эти частицы вместе со струей воды реализуют формообразующее воздействие на материал детали. У каждого вида резания свое назначение. Гидрорезкой без абразива режут мягкие материалы, а гидроабразивной резкой – твердые материалы, например, металлы, композиты и керамику. Необходимо отметить, в целом ГАР существенно эффективнее ГР [3, 4].

Настоящая работа посвящена исследованию процессов, сопровождающих ГАР, на базе численных методов механики сплошной среды с использованием программного комплекса AUTODYN. При этом решение задачи в целом было разбито на четыре этапа. Этап 1 – моделирование движения жидкости в соплах коллектора различной формы с последующим выявлением особенностей движения абразивных частиц и струи жидкости на выходе из сопла. Этап 2 – установление зависимостей изменения осевой скорости абразивных частиц в канале фокусирующего насадка от варианта используемых начальных условий, выявленных на первом этапе. Этап 3 – анализ взаимодействия частиц с внутренними стенками соплового насадка. Этап 4 – моделирование взаимодействия жидкой и гидроабразивной струй с материалом обрабатываемой детали.

При моделировании движения жидкости в соплах различной конфигурации было рассмотрено две расчетные схемы, показанные на рис. 1 и рис. 2.

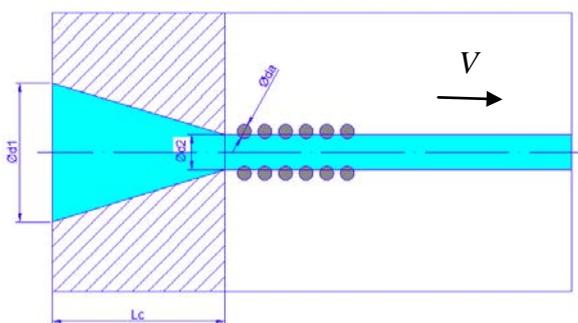


Рис. 1. Идеализированная расчетная схема 1, где  $V = 0,6$  км/с – скорость струи (воды);  $d_1 = 4$  мм,  $d_2 = 1$  мм – начальный и конечный диаметры сопла;  $L_c = 50$  мм – длина сопла;  $d_a = 0,4$  мм – диаметр частиц абразива (SiO)

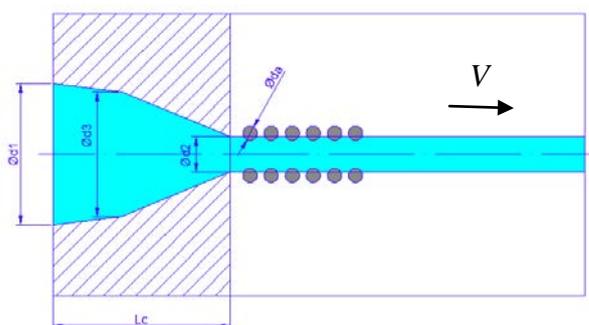


Рис. 2. Расчетная схема 2, где  $V = 0,6$  км/с – скорость струи (воды);  $d_1 = 4$  мм,  $d_2 = 1$  мм,  $d_3 = 3$  мм – начальный, конечный и промежуточный диаметры сопла;  $L_c = 50$  мм – длина сопла;  $d_a = 0,4$  мм – диаметр частиц абразива (SiO)

Для численного моделирования процессов движения жидкости в канале соплового насадка и последующего взаимодействия струи с частицами абразива (см. рис. 1, 2, этап 1) выбран совместный эйлерово-лагранжев подход (СЭЛ) [5], в котором движение жидкости рассматривалось на эйлеровой сетке, а частицы абразива рассчитывались в переменных Лагранжа. В осесимметричной постановке все параметры движения и состояния среды рассматриваются как функции переменных – времени  $t$  и двух координат  $X$  и  $Y$  (не зависит от третьей координаты  $\Theta$ ). В этом случае система уравнений, описывающая двумерное осесимметричное течение, имеет классический вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x)}{\partial X} + \frac{\partial (\rho v_y)}{\partial Y} + \frac{\rho v_x}{X} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{d v_x}{d t} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial X} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial Y} + \frac{2D_{xx} + D_{yy}}{X}; \quad \rho \frac{d v_y}{d t} = \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial Y} + \frac{\partial D_{xy}}{\partial X} + \frac{D_{xy}}{X} \quad (2)$$

$$\rho \frac{d e}{d t} = \sigma_{xx} \dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy} \dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{\theta\theta} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + 2\sigma_{xy} \dot{\epsilon}_{xy} \quad (3)$$

$$\rho = f(\rho, e) \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial v_x}{\partial X}, \quad \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_x}{X}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v_y}{\partial Y}, \quad \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_x}{\partial Y} + \frac{\partial v_y}{\partial X} \right), \quad \dot{\epsilon}_{x\theta} = \dot{\epsilon}_{y\theta} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^e + \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (6)$$

$$\frac{D D_{xx}}{D t} = 2G \left( \dot{\epsilon}_{xx} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d \rho}{d t} \right), \quad \frac{D D_{yy}}{D t} = 2G \left( \dot{\epsilon}_{yy} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d \rho}{d t} \right), \quad \frac{D D_{xy}}{D t} = G (\dot{\epsilon}_{xy}) \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = -pg_{ij} + D_{ij} \quad (8)$$

$$f = 2 \cdot (D_{XX}^2 + D_{XY}^2 + D_{YY}^2 + D_{XX} \cdot D_{YY}) \leq \frac{2}{3} \sigma^2 \quad (9)$$

Здесь  $t$  – текущее время;  $\rho$  – плотность;  $p$  – давление;  $e$  – удельная внутренняя энергия;  $X, Y$  – осевая и радиальная координаты;  $v_X, v_Y$  – компоненты вектора скорости;  $g_{ij}$  – метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем  $i, j = X, \theta, Y$  (цилиндрическая двумерная система координат);  $\sigma_{XX}, \sigma_{YY}, \sigma_{\theta\theta}$  – нормальные напряжения в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях;  $\sigma_{XY}$  – касательные напряжения;  $D_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  – компоненты тензора скоростей деформаций;  $\dot{\varepsilon}_{ij}^e, \dot{\varepsilon}_{ij}^p$  – упругие и пластические составляющие скорости деформации;  $D(\dots)/Dt$  – производная Яуманна;  $G$  – модуль сдвига;  $\sigma$  – динамический предел текучести среды.

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы (1), импульса (2) и энергии (3), в общем виде уравнение состояния взаимодействующих сред (4), кинематические соотношения (5), следствие аддитивности упругих и пластических компонент деформации (6), закон Гука в дифференциальной форме (7), компоненты тензора напряжений (8) и условие пластического течения Мизеса (9).

Уравнения состояния для металлов и кварцевого песка брались в форме линейной баротропной зависимости давления от плотности  $p = K(\rho/\rho_0 - 1)$ , а для других материалов – полиномиальной зависимости вида  $p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu) \cdot \rho_0 \cdot e$ , где  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ;  $\rho, \rho_0$  – текущая и начальная плотности среды соответственно.

Физико-механические константы используемых материалов принимались следующими: для воды начальная плотность  $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $A_1 = 2,2 \text{ ГПа}$ ,  $A_2 = 9,54 \text{ ГПа}$ ,  $A_3 = 14,57 \text{ ГПа}$ ,  $B_0 = B_1 = 0,28 \text{ ГПа}$ ; для материала сопла коллектора и соплового насадка (W)  $\rho_0 = 19,35 \text{ г/см}^3$ , модуль объемного сжатия  $K = 292 \text{ ГПа}$ , модуль сдвига  $G = 135 \text{ ГПа}$ , динамический предел текучести  $\sigma = 1 \text{ ГПа}$ ; для материала преграды (АМг6)  $\rho_0 = 2,64 \text{ г/см}^3$ ,  $K = 60 \text{ ГПа}$ ,  $G = 26,3 \text{ ГПа}$ ; для материала абразива (SiO)  $\rho_0 = 3 \text{ г/см}^3$ ,  $K = 214 \text{ ГПа}$ ,  $G = 181 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma = 6 \text{ ГПа}$  и другого абразива (SiO<sub>2</sub>)  $\rho_0 = 2,2 \text{ г/см}^3$ ,  $K = 160 \text{ ГПа}$ ,  $G = 135 \text{ ГПа}$ ,  $\sigma = 6 \text{ ГПа}$ . Для АМг6 и SiO<sub>2</sub> критическая интенсивность деформации принималась идентичной:  $\varepsilon^* = 0,43 \text{ ГПа}$ .

В ходе исследования выяснилось, что форма сопла (рис. 3) значительно влияет на темп увеличения скорости струи жидкости: чем больше разница начального и конечного диаметра сопла, тем она быстрее набирает конечную скорость. Промежуточные диаметры

в сопле (см. рис. 3, б) нежелательны – они замедляют темп набора скорости и значительно увеличивают радиальную составляющую скорости струи.

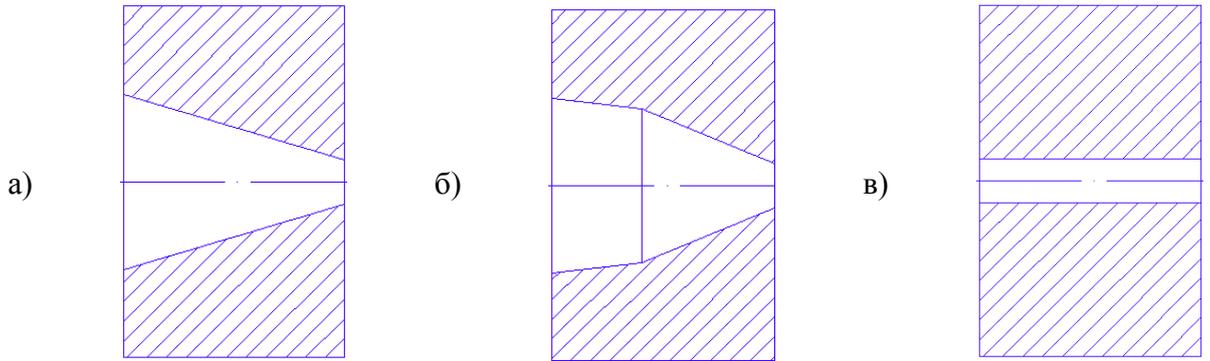


Рис. 3. Используемые конфигурации внутренней поверхности коллектора

Полученные расчетные данные осевых и радиальных составляющих скоростей струи на выходе из сопла коллектора использовались в качестве начальных условий для оценки параметров движения струи и частиц абразива. Он представлен на рис. 4, 5.

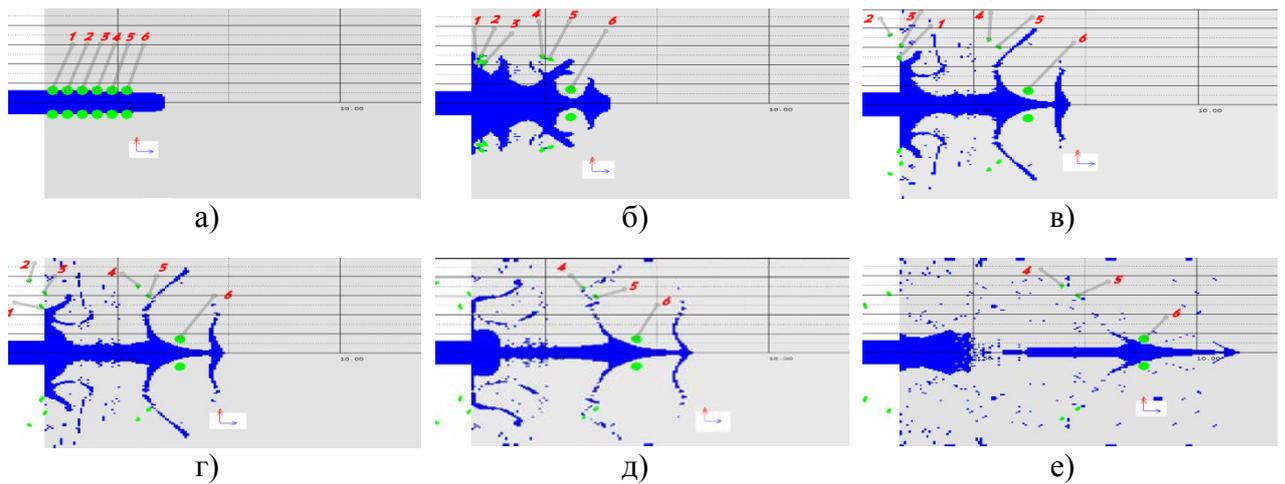


Рис. 4. Характер взаимодействия участка струи, вытекающей из конусообразного сопла, с частицами абразива

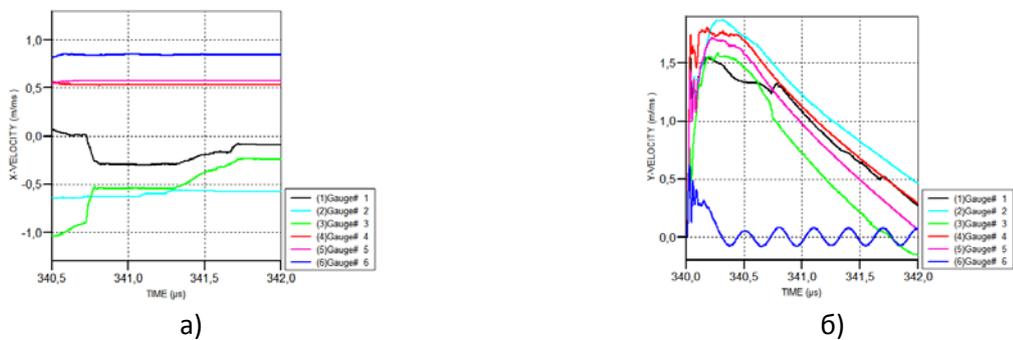


Рис.5. Осевые (а) и радиальные (б) составляющие скорости частиц абразива

Так как в данном конкретном случае фокусирующий насадок не использовался, на представленных иллюстрациях (рис. 4) виден интенсивный разлет струи в радиальном направлении. Этого, естественно, не наблюдалось бы при наличии фокусирующего насадка. Необходимо отметить высокую радиальную скорость частиц абразива, достигающую 1,5 км/с и более (рис. 5). Можно отметить также существенное искажение формы частиц абразива уже на начальном участке взаимодействия их со струей (см. рис. 6).



Рис. 6. Форма частиц абразива до (а) и после (б) взаимодействия со струей

На втором этапе исследования анализировался характер набора скорости абразивных частиц вдоль канала фокусирующего насадка. Выбранная параметрическая расчетная схема условно показана на рис. 7 и составлена на основе данных работы [6]. При этом в качестве рабочей была выбрана двухмерная осесимметричная  $X, Y$ - модель.

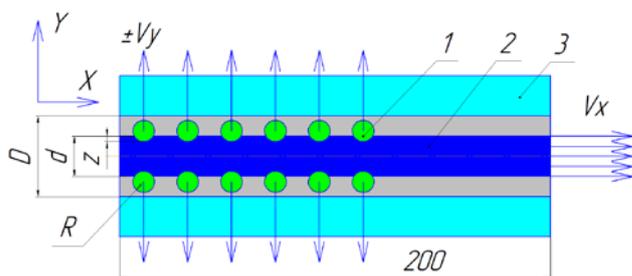


Рис. 7. Параметрическая расчетная схема, где 1 – абразивная частица; 2 – струя жидкости; 3 – фокусирующий насадок;  $D$  – диаметр канала фокусирующего насадка;  $d$  – диаметр струи жидкости;  $z$  – величина захвата абразивных частиц струей жидкости;  $R$  – радиус абразивных частиц;  $V_x$ ,  $V_y$  – скорости абразивных частиц в осевом и радиальном направлениях

Числовые значения геометрических параметров фокусирующего насадка принимались следующими –  $D = 1,6$  мм;  $d = 1$  мм. В процессе исследования определялись следующие зависимости:

- изменение продольной скорости частиц от величины их захвата струей жидкости ( $z$ );
- изменение продольной скорости частиц от величины и направления их начальной радиальной скорости ( $V_y$ );
- изменение продольной скорости частиц от числового значения их радиуса.

В процессе исследования было замечено, что вне зависимости от используемых начальных условий в некоторый момент времени происходит скопление частиц в канале фокусирующего насадка, и в дальнейшем они движутся вместе. Это продемонстрировано на рис. 8.

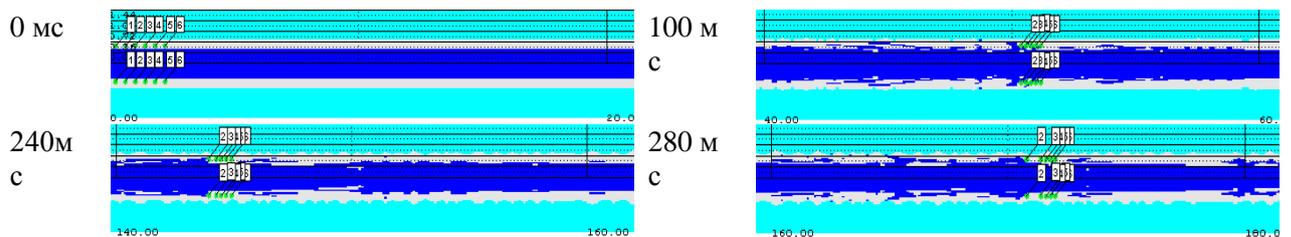


Рис.8. Характер движения частиц в канале фокусирующего насадка

Отмеченное скопление частиц обусловлено использованием двумерной модели, в которой абразивные частицы по форме являются не сферическими, а торовыми телами. Поэтому в дальнейшем важно устранить этот недостаток и использовать трехмерную модель взаимодействия частиц с поверхностью канала насадка. Несмотря на указанные недостатки, полученные результаты дают представление о характере набора скорости частиц в осевом направлении.

В качестве базовой зависимости изменения продольной скорости выбраны следующие числовые значения параметрической схемы (рис. 7):  $z = 0$  мм,  $R = 1$  мм,  $V_y = 100$  м/с,  $V_x = 800$  м/с.

Соответствующий базовым значениям характер изменения осевой скорости от времени и расстояния представлен на рис. 9. Основной набор скорости происходит на участке 0...50 мм, что позволяет сократить длину фокусирующего насадка.

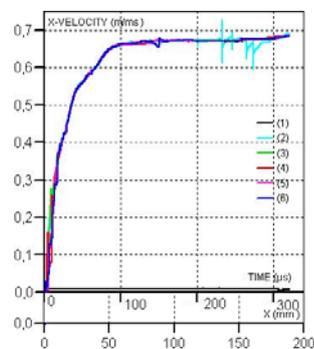


Рис. 9. Характер изменения осевой скорости в зависимости от времени  $t$  и расстояния по оси  $X$

Результаты моделирования процесса при разных числовых значениях величины  $z$  (захват абразивных частиц струей жидкости) представлены на рис. 10. Они показывают, что конечная скорость частиц изменяется от 86 %  $V_x$  (при  $z = 0$ ) до 98 %  $V_x$  (при  $z = 2 \cdot R$ ).

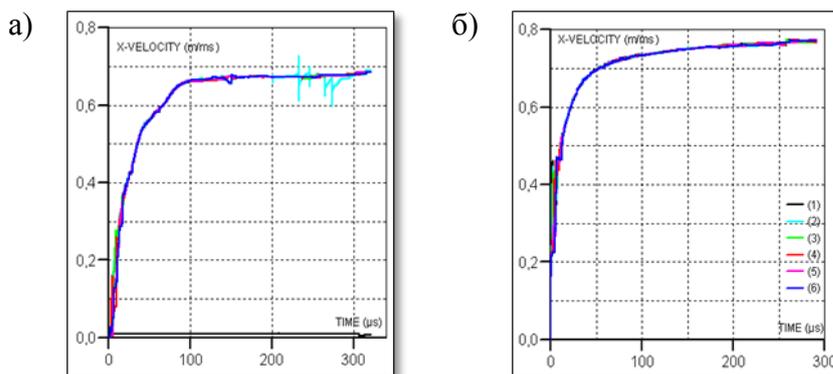


Рис. 10. Характер полученных зависимостей изменения продольной скорости частиц от величины  $z$ : а)  $z = 0$ ; б)  $z = 2 \cdot R$  ( $V_y = 100$  м/с;  $V_x = 800$  м/с;  $R = 1$  мм)

Полученные зависимости вида  $V_x = f(V_y)$  и  $V_x = f(R)$  носили идентичный характер. При этом необходимо отметить, что изменение начальных числовых значений радиальной скорости не влияло на конечную осевую скорость абразивных частиц. И это, как уже указывалось, можно связать с недостатками выбранной модели. В то же время изменение радиуса абразивных частиц оказывало определенное влияние на их осевую скорость. Так при  $R = 1$  мм осевая скорость составляет 93 %  $V_x$ , а при  $R = 1,5$  мм – 88 %  $V_x$ . Величина захвата частиц струей жидкости в обоих вариантах принималась равной  $z = R$ .

При моделировании взаимодействия абразивных частиц с внутренними стенками соплового насадка в трехмерном приближении использовались те же материалы, что и при решении соответствующей двумерной задачи. При этом результаты модельного расчета представлены на рис. 11.

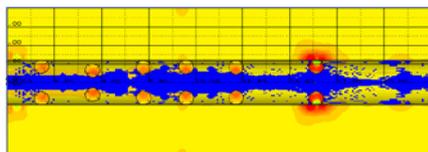


Рис. 11. Результаты модельного расчета движения частиц абразива в канале соплового насадка

В этом случае частицы абразива совершают сложное колебательное движение. В начальный момент времени частица абразива отталкивается от воды и взаимодействует со стенкой струеформирующего канала соплового насадка (рис.11), создавая в нем сложное напряженно-деформационное состояние в зоне контакта. Колебания частиц происходят неравномерно, следствием чего является неравномерный износ струеформирующего канала, показанного на рис. 12.

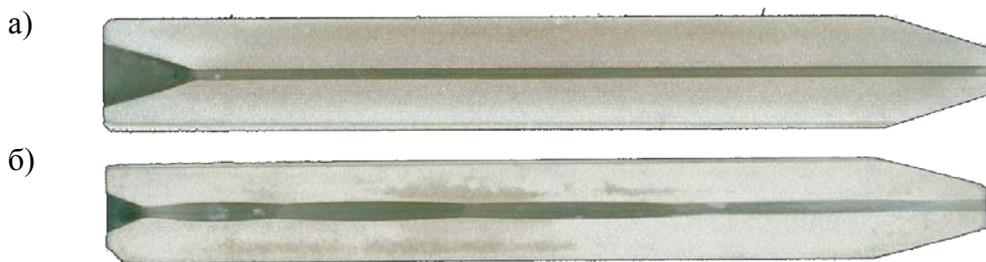


Рис. 12. Сопловые насадки: а) новый, б) отработавший 50 часов

На рис. 13 изображены иллюстрации высокоскоростного взаимодействия струи диаметром  $d = 1$  мм ( $V = 0,8$  км/с) с преградой из алюминиевого сплава АМг6 толщиной  $h = 5$  мм [6].

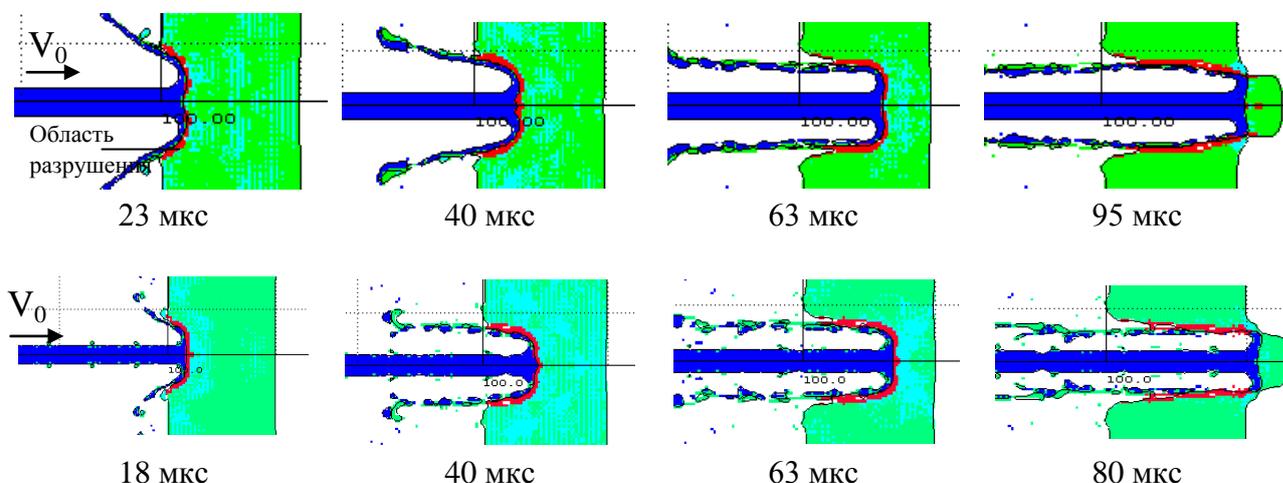


Рис. 13. Результаты расчетов проникновения высокоскоростной струи воды в алюминиевую преграду

При этом рассматривались варианты резки чистой струей и струей с частицами абразива, в качестве которого рассматривался кварцевый песок ( $\text{SiO}_2$ )  $d = 0,4$  мм. Как показано [6], в качестве критерия разрушения материала преграды целесообразно использовать деформационный критерий вида  $\varepsilon_p \leq \varepsilon_p^*$ , где  $\varepsilon_p = \sqrt{2/3} \sqrt{\varepsilon_p^{ij} \varepsilon_p^{ij}}$  – интенсивность пластических деформаций;  $\varepsilon_p^{ij}$  – пластические составляющие компонент тензора деформаций;  $\varepsilon_p^*$  – предельная (критическая) пластическая деформация. При этом предельные числовые значения критических деформаций принимались равными 0,43. Результаты выполненных расчетов показывают более высокую скорость резки ГАР по сравнению с ГР, что не противоречит известным экспериментальным данным.

В заключение отметим сложность математического моделирования динамических процессов, сопровождающих гидро- и гидроабразивный виды обработки материалов. Эта сложность обусловлена, в общем случае, необходимостью использования трехмерных моделей и соответствующих численных методов расчета (что не всегда возможно), недостаточным представлением о поведении соответствующих материалов в условиях ГР и ГАР, в частности недостаточным знанием их критериев разрушения. Поэтому настоящая работа является начальным этапом в плане освоения поставленных задач, решение которых позволит существенно расширить возможности данного вида обработки материалов.

## Список литературы

1. [http://www.vodorezka.ru/obl\\_prim\\_thn\\_gidrorezki.html](http://www.vodorezka.ru/obl_prim_thn_gidrorezki.html)
2. <http://ru.wikipedia.org/wiki>
3. Ультрасушная технология получения микросуспензий / О.Е. Балашов, А.А. Барзов, А.Л. Галиновский и др. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
4. Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной резке // Вестник МГТУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 1 (86). – С. 107 – 116.
5. Нох В.Ф. СЭЛ – совместный эйлерово-лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 128-184.
6. Казакова О.И., Колпаков В.И. Численное моделирование гидроабразивной резки листовых заготовок из алюминиевых сплавов // Известия высших учебных заведений. Серия «Машиностроение». 2012. № 7. С. 56-60.