

УДК 621.9.048.7

## Факторная модель ультраструйной гидроэрозии\*

**А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, М.И. Абашин**

*Рассмотрены методы факторного анализа гидроэрозионного разрушения высокоскоростной струей жидкости. Предложен оригинальный вид уравнения математической модели в полиномиальной форме. Для главных членов уравнения использован физический подход, для членов, учитывающих влияние факторов, — эмпирический. Приведены группы факторов, влияющие на процесс гидроэрозии для ультраструи, мишени и группа условий эксперимента.*

**Ключевые слова:** фактор, ультраструя, диагностика, функция отклика, информативный признак, факторный анализ.

## Factor model of ultra-jet hydroerosion\*

**A.A. Barzov, A.L. Galinovsky, M.I. Abashin**

*The article considers the methods of factor analysis for the height-velocity water jet hydroerosion phenomenon. The original form of the polynomial mathematical model formula is presented. The theoretical approach is used for main members of the formula and the empiric approach is used for factor members. Factors which make influence on the hydroerosion process on the part of ultra-jet, target and experiment conditions are offered in separated blocs.*

**Keywords:** factor, ultra-jet, diagnostics, response function, informative sign, factor analysis.

Явление гидроэрозии наблюдается при работе лопаток паровых турбин, лопастных насосов, гребных винтов судов и других деталей, работающих в условиях интенсивных жидкостных и паровых потоков. Это же явление лежит и в основе совокупности традиционных и инновационных гидроструйных технологий, таких как: гидрорезание различных материалов [1], гидроочистка поверхностей от загрязнений [2], гидромодификация поверхности, получение микросуспензий [3], гидроструйная диагностика поверхностного слоя изделий [4].

Суть гидроэрозии описана в трудах ряда отечественных и зарубежных авторов: В.В. Фомина, Р.А. Тихомирова, М. Hashish, W.F. Adler, O.G. Engel, A.A. Fyall и других ученых.

Однако, не смотря на широкое использование данного явления в технике, механизмы гидроэрозии недостаточно изучены. Существующие литературные источники содержат достаточный объем противоречивых данных. Так, в частности, до сих пор отсутствует однознач-



**БАРЗОВ**  
Александр Александрович  
доктор технических наук,  
профессор



**ГАЛИНОВСКИЙ**  
Андрей Леонидович  
кандидат технических  
наук, доктор  
педагогических наук,  
доцент, профессор



**АБАШИН**  
Михаил Иванович  
ассистент  
кафедры «Технологии  
ракетно-космического  
машиностроения»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
e-mail: texhelp@list.ru

\* Данное исследование проводилось в рамках гранта президента РФ № 16.120.11.5069-МД и грантов РФФИ № 12-08-00802-а, РФФИ 12-08-33022.

ность в описании влияния некоторых факторов на процесс разрушения материала в процессе гидроструйной обработки, отсутствуют физико-математические модели, описывающие процесс гидроэрозионного разрушения.

Таким образом, задача создания математической модели гидроэрозии материалов является актуальной и может способствовать расширению научных представлений о данном явлении, что позволит в дальнейшем использовать их на практике в различных областях машиностроения.

Наиболее подробно вопросы гидроэрозии изучаются в ультразвуковой диагностике (УСД) (от лат. *ultra* — сверх) материалов ввиду использования параметров разрушения как основного информативного фактора данного метода. Под УСД понимают определение текущего состояния поверхностного слоя объекта исследования путем воздействия на него высокоскоростной струи жидкости (ультраструи) с дальнейшей оценкой параметров данного воздействия, исходя из которых, может быть сделано заключение о характеристиках диагностируемого объекта. Структурная схема гидродиагностирования, поясняющая процедуру УСД, представлена на рис. 1.

**Факторный анализ в ультразвуковой гидроэрозии (УСГ).** Существенную роль в рационализации и исследовании различных процессов играют такие разделы науки, как планирование эксперимента и математическое моделирование [5].

Для выявления взаимосвязей и эффективного анализа физических явлений при ультразвуковой гидроэрозии необходимо определить взаимовлияние между наиболее существенными факторами, влияющими на рассматриваемый технологический процесс, которые определяют ход его протекания, описывая их количественно.

Факторная модель гидроэрозии может быть эффективно использована для описания сложных процессов, происходящих при ультразвуковой обработке и диагностике материалов. Традиционно факторный анализ наиболее широко применяется в экономических науках. В зависимости от источников информации, ис-

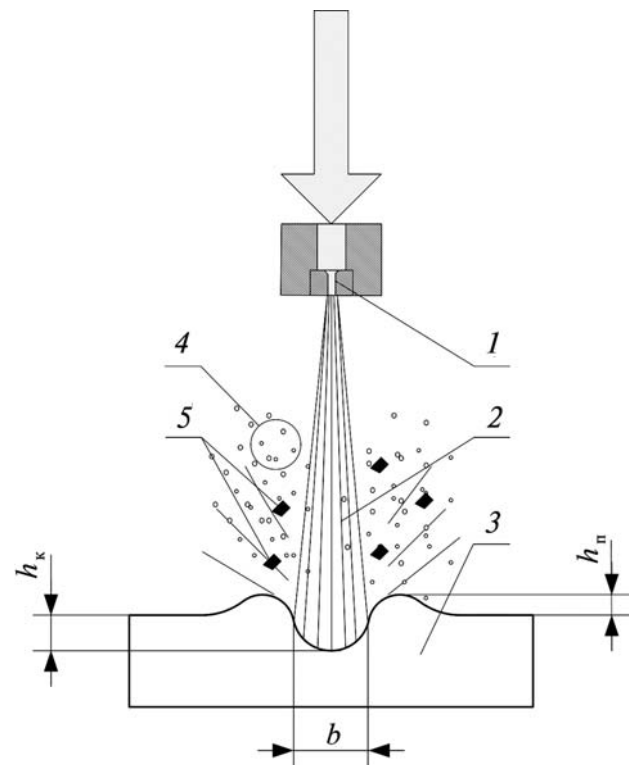


Рис. 1. Структурная схема гидродиагностирования:

- 1 — сопло гидроструйной установки; 2 — ультразвуковая струя жидкости (воды); 3 — исследуемый образец (мишень);
- 4 — облако мелкодисперсного спрея;
- 5 — отколовшиеся частицы мишени;  $b$  — ширина образовавшейся гидрокаверны;  $h_k$  — глубина гидрокаверны;  $h_n$  — высота валика пластического оттеснения

пользуемых при построении моделей, последние подразделяют на физико-химические (аналитические) и статистические [5]. Построение теоретических моделей сопряжено с проведением обширных и длительных исследований, в результате чего они описываются математически сложно, но позволяют не только с достаточной точностью представить процессы, но и допускают экстраполяцию в область, где невозможно непосредственное наблюдение [6, 7].

Для описания УСГ выбран физический подход для основных слагаемых модели, частично совмещенный со статистическим подходом при описании факторов влияния, так как данное явление многофакторное и не все его механизмы изучены достаточно полно.

Основными задачами факторного анализа УСГ являются:

1) отбор факторов влияющих на характеристики УСГ поверхности;

2) изучение априорной информации. Классификация и систематизация факторов с целью обеспечения комплексного и системного подхода к исследованию их влияния на результаты ультразвукового воздействия;

3) определение формы зависимости между факторами и результативными показателями УСГ. Выбор типа модели;

4) моделирование взаимосвязей между факторами и результативными показателями УСГ;

5) расчет влияния факторов и оценка роли каждого из них в изменении результативного показателя УСГ. Реализация выбранного способа решения задачи математического моделирования;

6) работа с факторной моделью с целью определения характеристик материала объекта воздействия.

Для создания факторной модели УСГ рационально использовать детерминированный многоступенчатый факторный анализ. Суть этого анализа состоит в исследовании влияния факторов, связь которых с результативными показателями носит функциональный характер. В этом случае исследование проводится с детализацией факторов, что позволяет изучать влияние факторов различных уровней соподчиненности, а результативный показатель представить в виде алгебраической суммы произведения факторов на коэффициенты влияния.

Помощь в создании модели может оказать теория планирования эксперимента, суть которой состоит в реализации процедуры выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

При этом существенным является следующее:

1) стремление к минимизации общего числа опытов;

2) одновременное варьирование всеми переменными, определяющими процесс, по специальным правилам — алгоритмам;

3) использование математического аппарата, формализующего многие действия экспериментатора;

4) выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии экспериментов.

Цель планирования эксперимента — нахождение таких условий и правил проведения опытов, при которых удастся получить надежную и достоверную информацию об объекте с наименьшей затратой труда, а также представить эту информацию в удобной и компактной форме с количественной оценкой точности [5].

В теории планирования эксперимента исследуемый объект рассматривается как черный ящик, имеющий входы (управляемые параметры): факторы  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и условия эксперимента  $u_1, u_2, \dots, u_n$  и выход  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_n)$  — функцию отклика или реакцию системы на изменение факторов или условий эксперимента (рис. 2). Функция отклика рассматривается как показатель качества или эффективности объекта и для УСГ она многомерная. Также на объект воздействуют возмущающие факторы, которые являются случайными и не поддаются управлению. Эти факторы формируют ошибку модели  $\epsilon$ .

Совокупность конкретных значений всех факторов образует точку в многомерном факторном пространстве. Пространство, координатные оси которого соответствуют значениям факторов, принято называть факторным пространством [5].

**Факторы УСГ.** Фактор — переменная величина, по предположению влияющая на результаты эксперимента. Различают факторы качественные и количественные. Однако, более предпочтительно использовать количественные факторы, а качественные факторы следует по возможности также переводить в количественные.

Факторами будем считать причины или особенности изменения характеристик гидроэрозионного разрушения.

Важно выбирать в качестве факторов лишь независимые переменные, т. е. только те, которые можно изменять, не затрагивая другие факторы. Факторы должны быть однозначными [5]. При выборе диапазонов изменения факторов следует учитывать их совместимость, т. е. контролировать, чтобы в этих диапазонах



Рис. 2. Исследуемый объект в виде черного ящика

любые сочетания факторов были реализуемы в опытах и не были абсурдными.

Выявление и количественное измерение степени выявления отдельных факторов на изменение результативных показателей УСГ — одна из важнейших задач факторного анализа. Влияние факторов по-разному отражается на изменении результативных показателей. Разобраться в причинах изменения характеристик исследуемого явления гидроэрозии — оценить место и роль каждого фактора в формировании величины результативных показателей — позволит классификация факторов. Исследуемые в анализе факторы могут быть классифицированы по разным признакам:

1) по взаимной обусловленности:

- зависимые (взаимодействующие) — факторы, которые взаимодействуют между собой в условиях опыта,
- независимые — в условиях опыта не взаимодействуют,
- условно независимые — взаимообусловленность носит нечетко выраженный характер и взаимовлияние относительно слабое;

2) по степени влияния на процесс УСГ:

- значительные — вносят значительный вклад в процесс,
- малозначительные — вклад в процесс вносят небольшой, однако их влияние подтверждено;

3) по стабильности во времени:

- постоянные — не зависят от времени длительности процесса;
- динамические — функция фактора меняет свое значение во время протекания процесса.

В детерминированном факторном анализе существует множество подходов к измерению влияния факторов. Для определения влияния постоянных независимых факторов возможно использование способа абсолютных разниц.

Особенно эффективно применять этот способ в том случае, если исходные данные уже содержат абсолютные отклонения по факторным показателям. Величина влияния факторов рассчитывается умножением абсолютного изменения исследуемого фактора на базовую величину.

Следует также различать факторы и условия эксперимента. Условиями эксперимента будем считать те параметры, которые в большей степени относятся к оборудованию или могут быть оперативно изменены во время УСД: расстояние от среза сопла до мишени, угол падения ультразвука к мишени, диаметр струи, скорость подачи режущей головки, скорость истечения струи и др.

**Структура модели.** Для построения эффективной математической модели гидроэрозии был проведен предварительный анализ значимости факторов и их сочетаний, в результате чего была сформирована структура модели УСГ.

Уравнение модели состоит из двух частей, в левой части которого собраны слагаемые, относящиеся непосредственно к ультразвуку, в правой части — к мишени:

$$P_w + \sum_i k_i^c f_i^c(x_i^c, u_1, u_2, \dots, u_m) = \sigma_B + \sum_j k_j^M f_j^M(x_j^M, u_1, u_2, \dots, u_m) + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $P_w$  — гидроконтрактное давление ультразвука;  $\sigma_B$  — предел прочности материала мишени;  $\varepsilon$  — ошибка модели (шум вследствие неконтролируемых или неучтенных факторов),

$$\varepsilon = f(x_1^c, x_2^c, \dots, x_i^c, x_1^M, x_2^M, \dots, x_i^M, u_1, u_2, \dots, u_m), \quad (2)$$

где  $f_i^c$  — функция  $i$ -го фактора влияния свойства ультразвука;  $x_i^c$  —  $i$ -й фактор влияния свойства ультразвука;  $k_j^M$  — коэффициент влияния  $i$ -го фактора свойства ультразвука на характеристики гидроэрозии;  $f_j^M$  — функция  $j$ -го фактора влияния свойства мишени;  $x_j^M$  —  $j$ -й фактор влияния свойства ультразвука;  $k_i^c$  — коэффициент влияния  $i$ -го фактора свойства

ультраструи на характеристики гидроэрозии;  $u_m$  — условие эксперимента.

Следует отметить, что погрешность в определении факторов отличается пренебрежимо малой ошибкой в сравнении с ошибкой в определении величины параметров функции отклика. Возникновение ошибки в определении функции отклика объясняется не столько погрешностью измерений, сколько влиянием на результат работы системы неучтенных или случайных факторов.

На начальном этапе воздействия гидроструи жидкости на поверхность твердого тела она ведет себя как капля жидкости той же скорости [8]. Следовательно, для анализа ультраструи справедливы соотношения, полученные для удара капли.

Гидроконтактное давление  $P_w$ , определенное по закону сохранения импульса для удара идеальной капли по поверхности полубесконечного тела, описывается следующей формулой [8]:

$$P_w = \frac{\rho_w C_w V_0}{1 + \frac{\rho_w C_w}{\rho_m C_m}}, \quad (3)$$

где  $V_0$  — скорость струи воды;  $\rho_w$  — плотность воды;  $C_w$  — скорость звука в воде;  $\rho_m$  — плотность материала преграды;  $C_m$  — скорость звука в материале преграды.

Закон изменения области контакта  $a(t)$  по времени воздействия  $t$  в радиальном направлении при ударе идеальной капли определяется по формуле [8]

$$a(t) = (2rV_0t - (V_0t)^2)^{0,5}. \quad (4)$$

Поскольку время  $t$  мало и выражением, содержащим  $t^2$ , можно пренебречь, как слагаемым более высокого порядка малости, переходим от формулы (4) к формуле

$$a(t) \approx (2rV_0t)^{0,5}, \quad (5)$$

где  $r$  — радиус капли (струи жидкости).

В монографии [8] показано, что критический размер зоны контакта  $a_c$  соответствует критической скорости растекания струи, когда радиус контактной области, при котором ударная волна, возникающая в момент удара, дос-

тигает точки на сфере, скорость которой в этот момент времени падает до значения скорости звука в воде:

$$a_c = \frac{V_0}{C_w}. \quad (6)$$

Подставив относительную скорость  $\frac{r}{a(t)}$  изменения радиуса контактной области в формулу (1), получим закон изменения давления по времени в контактной области:

$$P_w(t) = \frac{\rho_w C_w V_0}{1 + \frac{\rho_w C_w}{\rho_m C_m}} \frac{r}{a(t)}. \quad (7)$$

Преобразуя формулу (7) с учетом (5), получаем

$$P_w(t) = \frac{\rho_w C_w}{1 + \frac{\rho_w C_w}{\rho_m C_m}} \left( \frac{rV_0}{2t} \right)^{0,5}. \quad (8)$$

Критическое время  $t_c$ , соответствующее критическому радиусу области контакта, с учетом формул (5) и (6) определяется по формуле

$$t_c = \frac{V_0 r}{2C_w^2} \quad (9)$$

и составляет около 2 мс.

В связи с многофакторностью явления гидроэрозии существует широкий спектр параметров, которые можно определить при помощи УСД.

Для того или иного свойства материала диагностируемого объекта необходимо выделить интересующий фактор на фоне остальных и на основании его анализа сделать вывод об определяемом свойстве объекта.

Точность определения параметров повышается с ростом точности значения и увеличением числа факторов.

**Особенности модели ультраструйной гидроэрозии при УСД материалов.** Особенность УСГ состоит в том, что она является многофакторной как по количеству независимых варьируемых параметров и условий эксперимента, так и по спектру функции отклика. Как показывают экспериментальные исследования, можно выбрать такой фактор, которому будет соответ-

ствовать определенный параметр функции отклика, однозначно связанный с определяемым параметром преграды. Конкретный параметр функции отклика в данном случае выступает в роли информативного признака. Для определения того или иного свойства преграды можно выбрать такое сочетание факторов ультраструи  $x_i^c$ , мишени  $x_j^m$  и условий эксперимента  $u_m$ , которые будут давать однозначно зависящий от исследуемого параметра  $I_k$  параметр функции отклика  $y_k$  (рис. 3).

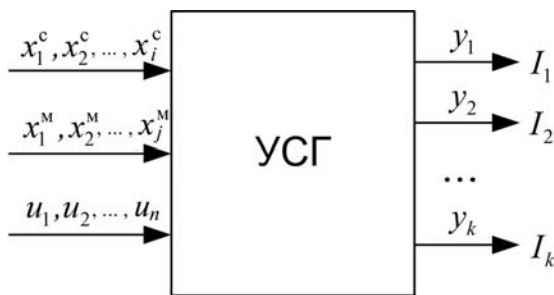


Рис. 3. Структура модели диагностического применения УСГ

На рисунке 4 представлена обобщенная схема, в которой приведены факторы, относящиеся непосредственно к ультраструе, мишени и условия эксперимента в порядке убывания их значимости (сверху вниз), а также параметры функции отклика, которые могут быть использованы в качестве информативных признаков УСД.

Таким образом, предпринята попытка структурирования имеющегося массива теоретических и экспериментальных данных в рамках одной математической модели. В дальнейшем предстоит проанализировать взаимовлияние факторов и их вклад в процесс гидроэрозионного разрушения твердотельной преграды.

Реализация данной модели на практике может способствовать решению проблем повышения стойкости деталей, подверженных воздействию потоков жидкости, снижению трудоемкости процедуры УСД и повышению результативности ее использования.

### Литература

1. Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной обработке // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. № 1(86). 2012. С. 107—116.



Рис. 4. Обобщенная схема влияния различных параметров на характеристики гидроэрозионного разрушения

2. Агасарян Р.Р. Зависимость несущей способности поверхностного слоя от способа финишной абразивной обработки // Вестник машиностроения. 1985. № 8. С. 66—68.  
 3. Ультразвуковое микросуспензирование жидкостей и гидротехнологических сред / А.А. Барзов, А.Л. Галиновский, Н.К. Литвин и др. // Фундаментальные проблемы техники и технологии. 2012. № 2—3(292). С. 3—7.  
 4. Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А. Ультразвуковая экспресс-диагностика материалов изделий машиностроения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 123. С. 141—147.  
 5. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Издательство Юрайт; ИД Юрайт, Пер. с англ. 2012. 399 с. Серия Магистр.  
 6. Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. М.: Мир, 1967. 406 с.  
 7. Налимов В.В., Голикова Т.И. Логические основания планирования эксперимента. М.: Металлургия, 1976. 72 с.  
 8. Эрозия. А. Эванс, А. Рафф, С. Видерхорн и др.: Пер. с англ. / Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. 464 с.

Статья поступила в редакцию 3.07.2012