

В.Г. ПЕТРОСЯН, Р.Р. ГЮЛБУДАГЯН

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ МАССЫ УДАРЯЮЩЕЙ ДЕТАЛИ, ЕЕ СКОРОСТИ В МОМЕНТ УДАРА И ПОСТРОЕНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ В ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СОССП

На основе гидродинамической теории ударных волн (УВ) разработан алгоритм распознавания массы ударяющей детали, ее скорости в момент удара и построены дисперсные соотношения УВ. Разработанный алгоритм внедрен в диагностическую систему СОССП (система обнаружения свободных и слабозакрепленных предметов), функционирующую на блоке №2 Армянской АЭС.

Ключевые слова: дисперсия, диагностика, ударная волна, механическая мембрана.

В современных действующих атомных электростанциях (АЭС) с целью повышения уровня ядерной безопасности эксплуатируются диагностические системы производства фирмы Siemens, в частности: звукового контроля утечек (Аls - СКТ) [1]; наблюдения за вибрациями (Sbs) [2]; наблюдения за корпусным шумом (Kbs - СОССП) [3] и т.д.

Задача системы наблюдения за корпусным шумом заключается в распознавании места образования шумов, получаемых вследствие ударов свободных и освободившихся частей в главном циркуляционном контуре реактора АЭС. Корпусные шумы, получаемые при ударе свободной детали по стенкам трубопроводов или встроенных элементов главного циркуляционного контура реактора, записываются пьезоэлектрическими датчиками ускорения в звуковой области СОССП в виде сложных сигналов (рис.1).

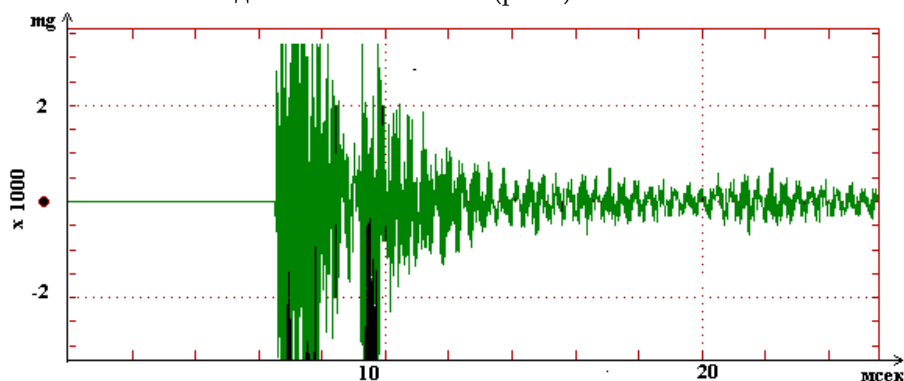


Рис.1. Сигнал от удара свободной детали в СОССП

Полученные вследствие удара сигналы обрабатываются различными методами.

Задачам обработки сигналов удара посвящены работы [4, 5]. В [5] разработан алгоритм определения массы свободного предмета по теории удара Герца, где контакт двух тел описывается решением в форме потенциала, который выражает напряжения и деформации вблизи точки контакта в виде функции геометрических и упругих свойств тел. В [4] для определения массы ударяющей детали использована модель поперечного контакта стальной сферы с плоской стальной поверхностью.

Однако при распознавании свободной ударяющей детали среди ее характеристик, кроме массы, важное значение имеет определение скорости в момент удара.

Для решения этой задачи предлагается алгоритм, разработанный по гидродинамической теории распространения ударных волн в сплошных телах [6], для определения массы ударяющей детали произвольной формы, ее скорости в момент удара при контакте ее с балкой большой массы.

При ударе детали массой $m_{от}$ произвольной формы под углом β о плоскую стальную поверхность балки в ней появляются косые УВ, конфигурация направлений в которой имеет следующий схематический вид (рис.2).

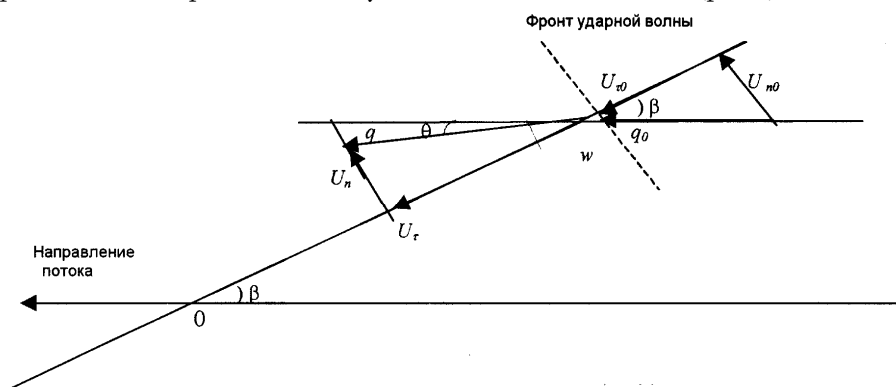


Рис.2. Конфигурация направлений в косой УВ

На рис. 2 сделаны следующие обозначения: $\vec{q}$, $\vec{q}_0$ — соответственно векторы скорости УВ за фронтом и перед фронтом; $\vec{U}_n$, $\vec{U}_{n0}$ — соответственно векторы нормальной составляющей скорости УВ за фронтом и перед фронтом; $\vec{U}_\tau$, $\vec{U}_{\tau0}$ — соответственно векторы тангенциальной составляющей скорости УВ за фронтом и перед фронтом. Отметим, что по теории косых волн $\vec{U}_\tau = \vec{U}_{\tau0}$, β — угол наклона ударяющей детали или наклона косой УВ; w — угол между линией фронта УВ и вектором скорости; θ — угол отклонения потока в косой УВ.

Алгоритм распознавания ударяющей детали с определением ее массы, скорости в момент удара имеет следующий вид:

$$U_{n0} = \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_0(1 - \frac{\rho_0}{\rho})}} , \quad U_n = \frac{\rho_0}{\rho} U_{n0} , \quad (1)$$

$$U_\tau = \frac{\rho U_n^2}{\sqrt{2\rho_0\rho U_n^2 + \rho_0^2 U_{n0}^2}} , \text{ когда } \beta = 0^\circ , \quad (2)$$

$$U_\tau^4 - 2(1 + \frac{\rho}{\rho_0})U_n \operatorname{ctg} \beta U_\tau^3 + \left[2 \frac{\rho}{\rho_0} U_n^2 \operatorname{ctg}^2 \beta - (1 + \frac{\rho}{\rho_0})^2 U_n^2 + \frac{U_{n0}^2}{\sin^2 \beta} \right] U_\tau^2 + \\ + 2 \frac{\rho}{\rho_0} (1 + \frac{\rho}{\rho_0}) U_n^3 \operatorname{ctg} \beta U_\tau - \frac{\rho^2}{\rho_0^2} U_n^4 \operatorname{ctg}^2 \beta = 0 , \text{ когда } 0 < \beta < 90^\circ , \quad (3)$$

$$U_\tau = \sqrt{(1 + \frac{\rho}{\rho_0})^2 U_n^2 - U_{n0}^2} , \quad \text{ когда } \beta = 90^\circ , \quad (4)$$

$$m_{oT} = \\ = \frac{0,0018\pi^{\frac{1}{3}}\tau[U_\tau \cos \beta + U_n \sin \beta]^{\frac{4}{3}} T^{\frac{8}{3}}}{g^{\frac{1}{3}}[U_{\tau 0} \cos \beta + U_{n0} \sin \beta + \sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}]^{\frac{2}{3}} \left[\frac{\cos \beta}{U_{\tau 0}} + \frac{\sin \beta}{U_{n0}} + \frac{\sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}}{U_{\tau 0} U_{n0}} \right]^{\frac{2}{3}}} , \quad (5)$$

$$m_{oT,0} - 0,01 < m_{oT} < m_{oT,10} + 0,01 , \quad (6)$$

$$r = 0,38T \sqrt{\frac{\tau}{\rho_0}} , \quad S_{\text{эКВ}} = 0,76\pi \sqrt{0,02m_{oT}\pi g \tau} , \quad w_{\max} = \frac{2m_{oT}g}{S_{\text{эКВ}}} , \\ h = 30 w_{\max} , \quad (7)$$

$$m = \rho_0 \pi r^2 h , \quad m_{\text{эКВ}} = 0,01 m , \quad m_B = \frac{2m_{\text{эКВ}}[U_\tau \cos \beta + U_n \sin \beta]}{U_{\tau 0} \cos \beta + U_{n0} \sin \beta + \sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}} , \quad U_{\tau 0, T} = \\ = \frac{m_B U_{\tau 0}}{m_{oT}} . \quad (8)$$

Гидростатическая компрессионная кривая, задаваемая как одна из формул эмпирического уравнения состояния конденсированной среды, имеет вид

$$\Delta P = \frac{B_1}{\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{\frac{2}{3}}} \left[e^{B_2 \left\{ 1 - \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{\frac{1}{3}} \right\}} - 1 \right] , \quad (9)$$

где ΔP – разность давлений сжатой и невозмущенной сред, определяемая как ордината основной частоты преобразования Фурье сигнала (рис.1); ρ – значение плотности сжатого состояния среды.

(Для стали константы B_1 и B_2 имеют значения: $B_1 = 0,624 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $B_2 = 8,099$).

В основной формуле (5) T - значение основного периода, определяемое из преобразования Фурье сигнала (рис.1).

При ударе свободной детали в стальном слое появляется механическая мембрана, где r - радиус мембраны; $S_{\text{экв}}$ - эквивалентная упругость; W_{max} - максимальное динамическое перемещение; h - толщина возбужденного слоя в среде; m - реальная масса мембраны; $m_{\text{экв}}$ - эквивалентная масса, определяемая из

соотношения $w_0 = \sqrt{\frac{S_{\text{экв}}}{m_{\text{экв}}}}$ ($w_0 = 2\pi f$ - основная резонансная частота); τ -

предельное значение текучести материала мембраны; m_v - "масса" волны, получаемая из закона сохранения массы в проекциях на направление потока волн (рис.2) и имеющая вид (8); $m_{\text{от}}$ - искомая масса свободно ударяющей детали, определяемая формулой (5) и имеющая вид

$$m_{\text{от}} = G(U_\tau, U_n, U_{n0}, \beta) T^{8/3}. \quad (10)$$

Закон (10) гласит, что масса ударяющей свободной детали произвольной формы прямо пропорциональна степени 8/3 основного периода преобразования Фурье ударного сигнала, а коэффициент пропорциональности определяется следующим образом:

$$G(U_\tau = U_{\tau 0}, U_n, U_{n0}, \beta) = \frac{0,0018\pi^{1/3} \tau [U_\tau \cos \beta + U_n \sin \beta]^{4/3}}{g^{1/3} [U_{\tau 0} \cos \beta + U_{n0} \sin \beta + \sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}]^{2/3} \left[\frac{\cos \beta}{U_{\tau 0}} + \frac{\sin \beta}{U_{n0}} + \frac{\sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2}}{U_{\tau 0} U_{n0}} \right]^{2/3}}. \quad (11)$$

Отметим, что при выводе (10), (11) использованы уравнения сохранения массы и импульса, которые имеют следующий вид (рис.2):

$$\rho_0 U_{n0} = \rho U_n, \quad (12)$$

$$P_0 + \rho_0 U_{n0}^2 = P + \rho U_n^2, \quad (13)$$

где ρ_0 - плотность невозмущенной среды; P - давление за фронтом УВ.

Как следует из (3), при одних и тех же значениях входных величин ΔP , ρ , T , β существует несколько вычисленных значений U_τ и тем самым несколько значений величины массы $m_{\text{от}}$. Многозначность вычисляемой величины ударяющей детали снижается с помощью следующего ограничения, которое следует из реальных условий задачи:

$$m_{\text{от}, \beta=0} - 0,01 < m_{\text{от}, \beta=90} < 0,01. \quad (14)$$

Для решения задачи определения массы ударяющей детали появляется необходимость учета условия адекватности ударяющего тела и косой УВ:

$$m_{0T} \left[U_{\tau 0,T} \cos \beta + U_{n0,T} \sin \beta + \sqrt{U_{n0,T}^2 + U_{\tau 0,T}^2} \right] = \\ = m_b \left[U_{\tau 0} \cos \beta + U_{n0} \sin \beta + \sqrt{U_{n0}^2 + U_{\tau 0}^2} \right] = 2m_{\text{эКВ}} [U_{\tau} \cos \beta + U_n \sin \beta], \quad (15)$$

где $U_{\tau 0,T}$ и $U_{n0,T}$ – тангенциальная и нормальная составляющие скорости тела.

Фактически выражение (15) учитывает условие эквивалентности ударяющего тела и косой УВ по их одинаковым воздействиям на появляющуюся механическую мембрану.

Отметим также, что при соударении детали условие баланса энергии при поперечном ударе определяется уравнением

$$\frac{1}{2} m_{0T} U_{\tau 0,T}^2 = \frac{1}{2} S_{\text{эКВ}} w_{\text{max}}^2, \quad (16)$$

где w_{max} – максимальное динамическое перемещение.

На основе формул (8), (11), (15), (16) получаем скорость ударяющей детали в момент удара:

$$U_{\tau 0,T} = \frac{m_b U_{\tau 0}}{m_{0T}}. \quad (17)$$

Для подтверждения результатов функционирования алгоритма (1) – (17) проведены эксперименты по поперечному удару деталей произвольной формы с заранее заданными массами и с известными в момент удара скоростями в реальных условиях на трубопроводах главного циркуляционного насоса, парогенераторе и межпатрубковой зоне. В таблице приведены значения величин масс и скоростей в момент удара, вычисленные алгоритмическим путем и соответствующие экспериментальным значениям при поперечном ударе ($\beta=90^\circ$).

Таблица

Перечень результатов эксперимента

Место*	m_{0T} (ист ин.), кг	m_{0T} (алгоритм) кг	$U_{\tau 0T}$ (истин.), м/с	$U_{\tau 0T}$ (алгоритм) м/с	$T \times 10^{-4}$ с
ГЦН –4	0,047	0,072	2,8	2,78	1,18
ГЦН –4	0,115	0,099	2,8	2,8	1,34
ГЦН –5	0,115	0,070	2,8	2,75	1,26
ГЦН –5	0,155	0,096	2,8	2,97	1,37
ПГ 2ПВ	0,221	0,192	3,13	3,54	1,8
ПГ 2ПВ	0,396	0,289	3,13	3,92	1,92

* ГЦН – главный циркуляционный насос, ПГ- парогенератор.

Как следует из табл., в некоторых событиях наблюдается большое расхождение между истинными и алгоритмическими значениями масс и скоростей, которое объясняется тем, что учет поверхности контакта с помощью механической мембраны с переменными характеристиками не вполне точно описывает явление удара, однако достаточно удовлетворительное с точки зрения потребности реальной задачи.

На основании (1) - (9) построим дисперсную характеристику УВ, определяемую в виде (рис.2):

$$v(T, \beta) = \sqrt{U_n^2(T, \beta) + U_t^2(T, \beta)} . \quad (18)$$

На рис. 3, 4 показаны дисперсные характеристики УВ при значениях периодов $T_1 = 1,18 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ и $T_2 = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ в зависимости от угла наклона удара.

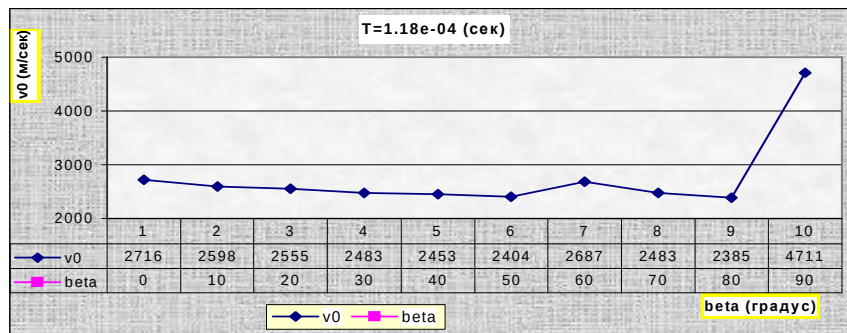


Рис.3. Угловая дисперсная характеристика УВ для значений периода $1,18 \cdot 10^{-4} \text{ с}$

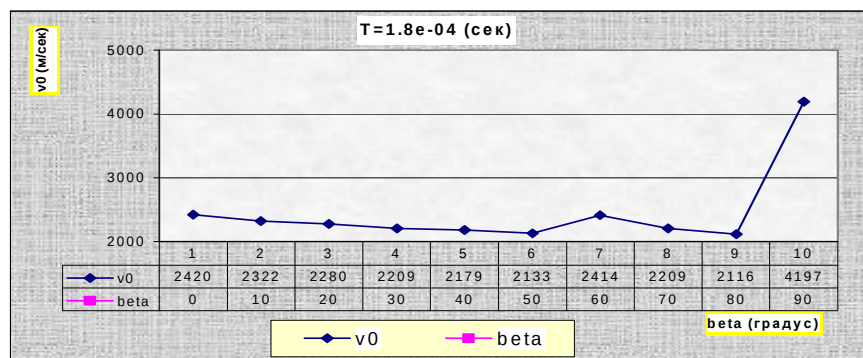


Рис.4. Угловая дисперсная характеристика УВ для значений периода $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ с}$

Как видно из графиков, ход функций $v_1=v(T_1, \beta)$ и $v_2=v(T_2, \beta)$ одинаков. Функции v_1 и v_2 для разных значений угла наклона отличаются своими величинами.

На рис. 5,6 приведены дисперсные соотношения при продольном ($\beta=0$) и поперечном ($\beta=90$) ударах. Из этих графиков следует, что ход дисперсных соотношений УВ при продольном $v_3=v(T, 0^\circ)$ и поперечном $v_4=v(T, 90^\circ)$ ударах одинаков, величины периода отличаются разными значениями величин скорости УВ.

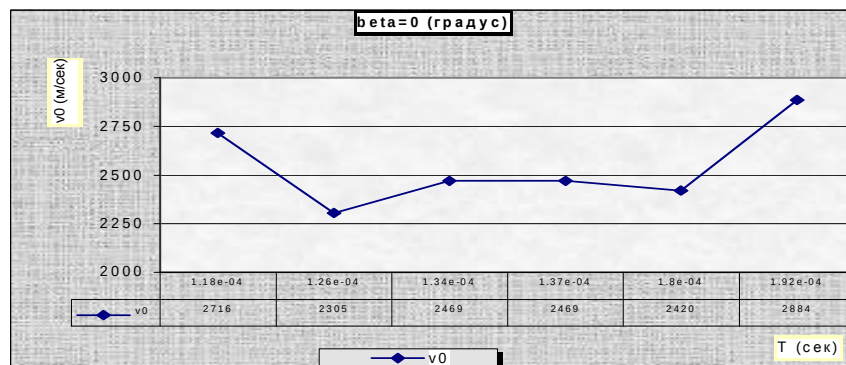


Рис.5. Дисперсная характеристика УВ при продольном ударе ($\beta = 0^\circ$)

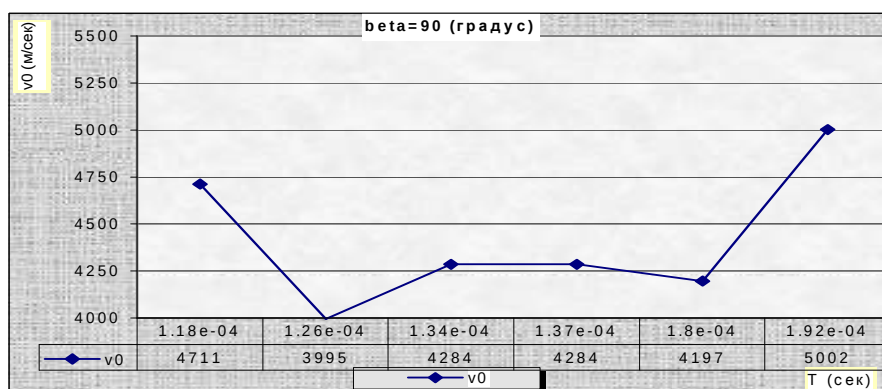


Рис.6. Дисперсная характеристика УВ при поперечном ударе ($\beta = 90^\circ$)

Значения скоростей УВ при одинаковых значениях периода УВ, промежуточных значениях угла наклона удара $0 < \beta < 90^\circ$ лежат между соответствующими значениями скоростей УВ для продольных и поперечных ударов.

В заключение отметим, что разработанный алгоритм распознавания массы ударяющей детали, ее скорости в момент удара, а также построенные дисперсные соотношения УВ внедрены в диагностическую систему СОССП, функционирующую в настоящее время на блоке №2 Армянской АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система звукового контроля утечек (АЬs) Siemens, 1988.
2. Система наблюдения за вибрациями (SЬs) Siemens, 1988.
3. Система наблюдения за корпусным шумом (КЬs), Siemens, 1988.
4. Методика обработки и анализа БИ (базовых измерений) для систем СКТ и СОССП: Научно-технический отчет / ВНИИАЭС.- М., 1997.
5. **Гольдсмит В.** Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. - М.: Стройиздат, 1965.

6. Косые ударные и детонационные волны / Под ред. В.С. Соловьева. - М.: Изд-во МВТУ, 1988.- 36 с.

Ин-т «Арматом». Материал поступил в редакцию 21.04.2000.

Վ.Գ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Ռ.Ռ. ԳՅՈՒԼԲՈՒԴԱԴՅԱՆ

**ՀԱՐՎԱԾՈՂ ԴԵՏԱԼԻ ՄԱՍՍԱՅԻ, ՀԱՐՎԱԾԻ ՊԱՀԻՆ ՆՐԱ ԱՐԱԳՈՒԹՅԱՆ
ՃԱՆԱՉՄԱՆ ԱԼԳՈՐԻԹՄ ԵՎ ԱԹԱՀՀ ԱԽՏՈՐՈՇՄԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳՈՒՄ
ՀԱՐՎԱԾԱՅԻՆ ԱԼԻՔՆԵՐԻ ԴԻՍՊԵՐՍԻԱՅԻ ՀԱՐԱԲԵՐԱԿՑՈՒԹՅԱՆ
ԿԱՌՈՒՑՈՒՄ**

Հարվածային ալիքների (ՀԱ) հիդրոդինամիկական տեսության հիման վրա մշակված է հարվածող դետալի մասսայի, հարվածի պահին նրա արագության ճանաչման ալգորիթմ և կառուցված է հարվածող ալիքների դիսպերսիայի հարաբերակցությունը: Մշակված ալգորիթմը ներդրված է ԱԹԱՀՀ (ազատ և թույլ ամրացված առարկաների հայտնաբերման համակարգ) ախտորոշման համակարգում, որը գործում է հայկական ԱԷԿ-ի թիվ 2 տեղամասում:

V.G. PETROSSYAN, K.K. GYULBUDAGHYAN

**IMPACTING MASS RECOGNITION ALGORITHM, ITS SPEEDS AT THE
MOMENT OF IMPACT AND DISPERSION CORRELATION
CONSTRUCTION IN THE DIAGNOSTICAL LOOSE AND LOOSE-FIXED
ITEMS DETECTION SYSTEM (LLIDS)**

Based on hydro-dynamic impact wave theory, the impacting part mass recognition algorithm, as well as its speeds at the moment of impact and constructed dispersion impact wave relationslip is developed. This algorithm is implemented in LLIDS system, functioning at Armenian Nuclear Power Station, unit 2.