

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.В. Худаско, А.И. Трофимов, С.А. Куркин, В.Г. Малынкин
Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск

Р

Представлен обобщенный метод определения напряженного состояния металла элементов оборудования АЭС, основанный на эффекте акустоупругости с учетом изменения температуры и деформации микроплощадок и микроотрезков и являющийся более точным по сравнению с существующими методами для определения модулей третьего порядка.

Ключевые слова: метод, измерения, напряжения, металла, оборудования АЭС, ультразвук, волны, скорость, температура, модули упругости.

Key words: method, measurement, tension, metal, equipment of the atomic power, ultrasound wave velocity, temperature, modulus of elasticity.

ВВЕДЕНИЕ

Оборудование АЭС работает при высоких давлениях и температурах [1–4]. Элементы оборудования АЭС испытывают большие силовые и температурные нагрузки и деформации. Наиболее напряженными элементами конструкций атомных станций являются твэлы, активные зоны, корпуса реакторов, циркуляционные трубопроводы, парогенераторы, технологические каналы, барабаны-сепараторы. Температуры топливных таблеток твэлов в центре достигают значений 2000–2500°C, максимальные температуры оболочек твэлов – 400–700°C. Температуры теплоносителя в активных зонах реакторов БН-600, ВВЭР-1000, РБМК-1000 могут достигать значений 600, 340, 290°C соответственно. Давление в корпусе реактора ВВЭР-1000 и парогенераторах БН-600 16–17 МПа, в технологических каналах РБМК-1000 и парогенераторах ВВЭР-1000 около 6–7 МПа. При нагреве металла элементов оборудования АЭС на 100°C относительные деформации $\delta l/l$ составляют порядка 10^{-3} , а такие деформации для сталей представляют собой область деформаций при ползучести. При этом возникают остаточные деформации и напряжения, которые накапливаются и могут приводить к разрушению оборудования.

Контроль напряженного состояния позволяет сократить объем работ по определению целостности металла и проводить обоснование продления сроков эксплуатации АЭС. Для контроля напряженного состояния в основном металле и сварных соединениях оборудования АЭС применяются тензометрический, радиационный и акустический неразрушающие методы [5]. Тензометрический метод применяется, главным образом, для измерения динамических напряжений, возникающих

в процессе работы оборудования АЭС. Для измерения остаточных напряжений в основном металле и сварных соединениях АЭС применяются радиационный и акустический методы. Радиационный метод позволяет измерять напряжения в поверхностном слое толщиной около 100 мкм. Остаточные напряжения по толщине металла могут контролироваться только с помощью акустического метода.

Акустический метод определения напряжений основан на эффекте изменения скорости распространения ультразвуковых волн под действием напряжений. Для описания скорости распространения акустических волн под влиянием напряжений используются нелинейные уравнения движения деформируемых тел и нелинейная связь тензора напряжений с тензором деформации [6–14]. Уравнения движения начально-деформированной упругой среды в координатах недеформированного тела, согласно [6–8, 10], имеют вид

$$\frac{\partial}{\partial x_l} \sigma_{lk}^* \left(\delta_{ki} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = \rho \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где u_i^* – вектор смещения; $\sigma_{lk}^* = \frac{S_l^*}{S_l} \frac{\sigma_{lk}}{\lambda_k}$ – тензор напряжений в деформированной

среде; $\frac{S_l^*}{S_l} = \sqrt{(1+2U_{mm})(1+2U_{pp}) - (2U_{mp})^2}$ – деформация площадок;

$\lambda_k = \sqrt{1+2U_{kk}}$ – удлинение отрезков; $U_{mm}, U_{pp}, U_{mp}, U_{kk}$ – компоненты тензора деформации, направления m и p , перпендикулярные направлениям l ;

$U_{lk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_l}{\partial u_k} + \frac{\partial u_k}{\partial u_l} + \frac{\partial u_l}{\partial u_l} \frac{\partial u_k}{\partial u_k} \right)$ – тензор деформации; σ_{lk} – тензор напряжений в не-

деформированной среде; $\delta_{ki} + \frac{\partial u_i}{\partial x_k}$ – смещение центра тяжести; ρ – плотность.

Связь тензора напряжений с тензором деформации определяется из первого начала термодинамики [6, 7] соотношением

$$\sigma_{ik} = \frac{\partial \Phi}{\partial U_{ik}},$$

где $\Phi = \frac{1}{2} \lambda U_{ll}^2 + \mu U_{ik} U_{ik} + \frac{a}{3} U_{ll}^3 + b U_{ll} U_{ik}^2 + \frac{c}{3} U_{ik} U_{kl} U_{li}$ – потенциальная энергия деформации тела [11]; λ и μ – коэффициенты Ляме; a, b, c – упругие модули третьего порядка. Проводя дифференцирование, получаем [8–10]

$$\sigma_{lk} = \lambda U_{tt} \delta_{lk} + 2\mu U_{lk} + a U_{tt}^2 \delta_{lk} + b (U_{tp}^2 \delta_{lk} + 2U_{lk} U_{tt}) + c U_{lt} U_{tk}. \quad (2)$$

Авторы [11–14] для определения скорости распространения акустических волн в начально-деформированной упругой среде использовали упрощенные уравнения движения, в которых пренебрегалось изменением микроотрезков и микроплощадок при деформации и не учитывалось смещение центра масс деформированной среды.

В [10] для определения скорости упругих волн использовались нелинейные уравнения движения деформируемых тел (1) и нелинейные уравнения (2), связывающие тензор напряжений с тензором деформации. Система уравнений (1,2) путем линеаризации приводилась к гиперболическим уравнениям, из которых определялись скорости распространения упругих волн в предварительно деформированных телах. Выражения для поляризованных акустических волн при нали-

чи начальных нормальных напряжений и при отсутствии касательных имеют вид

$$\begin{aligned}
 \rho c_{xx}^2 &= \left(1 + \frac{\partial u_y^0}{\partial y} + \frac{\partial u_z^0}{\partial z}\right) (\lambda + 2\mu) + 2a \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t} + 2b \left(2 \frac{\partial u_x^0}{\partial x} + \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t}\right) + 2c \frac{\partial u_x^0}{\partial x}; \\
 \rho c_{yy}^2 &= \left(1 + \frac{\partial u_x^0}{\partial x} + \frac{\partial u_z^0}{\partial z}\right) (\lambda + 2\mu) + 2a \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t} + 2b \left(2 \frac{\partial u_y^0}{\partial y} + \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t}\right) + 2c \frac{\partial u_y^0}{\partial y}; \\
 \rho c_{zz}^2 &= \left(1 + \frac{\partial u_x^0}{\partial x} + \frac{\partial u_y^0}{\partial y}\right) (\lambda + 2\mu) + 2a \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t} + 2b \left(2 \frac{\partial u_z^0}{\partial z} + \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t}\right) + 2c \frac{\partial u_z^0}{\partial z}; \\
 \rho c_{xy}^2 &= \sigma_{xx}^0 + \mu \left(1 + \frac{\partial u_y^0}{\partial y} + \frac{\partial u_z^0}{\partial z}\right) + b \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t} + \frac{c}{2} \left(\frac{\partial u_x^0}{\partial x} + \frac{\partial u_y^0}{\partial y}\right); \\
 \rho c_{xz}^2 &= \sigma_{xx}^0 + \mu \left(1 + \frac{\partial u_y^0}{\partial y} + \frac{\partial u_z^0}{\partial z}\right) + b \frac{\partial u_t^0}{\partial x_t} + \frac{c}{2} \left(\frac{\partial u_x^0}{\partial x} + \frac{\partial u_z^0}{\partial z}\right),
 \end{aligned} \tag{3}$$

где $\frac{\partial u_i^0}{\partial x_k} = \frac{1}{E} [\sigma_{ik}^0 (1 + \sigma) - \sigma \sigma_{ll}^0 \delta_{ik}] + \alpha (T - T_0) \delta_{ik}$ – предварительная деформация; α –

коэффициент температурного расширения (здесь для расчета компонент деформаций используется как первое приближение линейная теория, далее будет показано, что такое приближение допустимо для оборудования АЭС). Как видно из уравнений (3), величины скорости акустических волн зависят не только от величин предварительной деформации [11–14,18], но и от температуры тела.

Уравнения (3) определяют скорости распространения продольных акустических волн в направлении осей x, y, z , а поперечных – в направлении оси x . Если поперечная акустическая волна распространяется в направлении осей y или z , то из выражений (3) путем циклической перестановки x, y, z можно получить выражения для значений скоростей в этих направлениях.

Из системы уравнений (1)–(2) путем упрощений можно получить модели расчета скорости распространения акустических волн, приведенных в работах [11–14], т.е. система уравнений (3) может рассматриваться как обобщение этих работ по расчету скоростей акустических волн в предварительно деформированных телах.

По измеренным скоростям акустических волн при деформации и уравнению (3) можно определить напряженное состояние металла оборудования АЭС, но при этом необходимо знать упругие модули второго и третьего порядков. Упругие модули второго порядка приведены в справочной литературе (например, [15, 16]), а модули третьего порядка определяются из линейной алгебраической системы уравнений, подобных (3). Однако, как следует из [11–14], значения этих модулей, полученных акустическим методом, сильно зависят от используемых моделей. Поэтому необходимо разработать методы определения модулей третьего порядка, не зависящих от акустических.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЕЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

В настоящее время имеются экспериментальные данные при равномерном всестороннем сжатии вещества [15] до давлений 10^4 МПа. Используя эти данные, получим соотношение, связывающее постоянные второго порядка с постоянными

третьего порядка. При этом компоненты тензоров нормальных напряжений и деформаций равны $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz}$, $U_{xx} = U_{yy} = U_{zz}$. Учитывая значения членов тензора деформации первого и второго порядков и пренебрегая членами выше второго порядка, из уравнений (2) получим соотношение

$$\sigma_{xx} = 3K \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left(\frac{3}{2}K + 9a + 9b + c \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2. \quad (4)$$

Экспериментальные данные по всестороннему сжатию вещества [15] часто представляют в виде уравнения состояния Мурнагана

$$P = \frac{K}{K'} \left[(V_0/V)^{K'} - 1 \right], \quad (5)$$

где K' – константа для конкретного материала. Раскладывая данное соотношение в ряд по степеням dV/V_0 до второго порядка, имеем

$$\sigma_{xx} = 3K \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left(\frac{9}{2}K - \frac{9K(K'+1)}{2} \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2. \quad (6)$$

Приравнивая коэффициенты в уравнениях (4) и (6) при производных $(\partial u_x / \partial x)^2$, получим

$$9a + 9b + c = -9K(K' + 2/3)/2. \quad (7)$$

Выведенное уравнение (7) и уравнения (5) являются критериями для выбора правильной модели и расчета модулей третьего порядка.

Следующие уравнения для модулей третьего порядка a , b и c можно получить, рассматривая другие процессы деформации. Например, если напряжение приложено только вдоль оси x , то $\sigma_{xx} = p$, $\sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0$, $\frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial u_y}{\partial y} = -\sigma \frac{\partial u_x}{\partial x}$ (здесь и для

двухосного процесса в соотношениях между компонентами деформаций используется как первое приближение линейная теория, далее будет показано, что такое приближение допустимо), то из уравнений (2) получаем

$$\sigma_{xx} = E \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left[\frac{1-2\sigma+2\sigma^2}{2-4\sigma} E + a(1-2\sigma)^2 + b(3-4\sigma+2\sigma^2) + c \right] \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2, \quad (8)$$

где σ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга.

Преобразуем правую часть выражения (4), чтобы использовать его для одноосного сжатия-растяжения. При этом воспользуемся линейной теорией упругости, из которого следует

$$\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)_{\text{од.}} = \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)_{\text{всес.}} / (1-2\sigma).$$

Подставляя данное соотношение в (4) и для одноосного сжатия-растяжения, получим

$$\sigma_{xx} = E \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right) - \left(\frac{9}{2}K(K'+1/3)(1-2\sigma)^2 \right) \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2. \quad (9)$$

Приравнивая коэффициенты в уравнениях (8) и (9) при $\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2$, имеем

$$a(1-2\sigma)^2 + b(3-4\sigma+2\sigma^2) + c = -\frac{9}{2}K(K'+1/3)(1-2\sigma)^2 - \frac{1-2\sigma+2\sigma^2}{2-4\sigma} E. \quad (10)$$

Выражение (10) является дополнительным уравнением для расчета модулей третьего порядка, а уравнение (9) дает возможность рассчитать деформации при одноосном сжатии-растяжении. В таблице 1 приведены расчетные значения деформаций при растяжении армко-железа по линейной и нелинейной теориям. Предел текучести армко-железа $\sigma_{0,2}=170$ МПа, для сталей предел текучести может достигать $\sigma_{0,2}=1000$ МПа. Как видно из таблицы, отличие значений деформаций, рассчитанных по линейной и нелинейной теориям, достигает 0,4% при изменении напряжения растяжения от 0 до 160 МПа. Если бы процесс упругой деформации продолжался до напряжения 1000 МПа (это характерно для сталей), то это отличие не превысило бы 3%.

Таблица 1

σ_x , МПа	0,1	10	100	160	1000
$\partial u_x / \partial x$ лин	5,000E-07	5,000E-05	5,000E-04	8,000E-04	5,000E-03
$\partial u_x / \partial x$ (9)	5,000E-07	5,001E-05	5,013E-04	8,036E-04	5,146E-03

Третье уравнение для определения модулей третьего порядка можно получить, рассматривая двухосную деформацию. Напряжение приложено вдоль осей x и y ,

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = p, \sigma_{zz} = 0, \frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \frac{\partial u_z}{\partial z} = -2\sigma / (1-\sigma) \frac{\partial u_x}{\partial x}, \text{ тогда из (2) следует}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{1-\sigma} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left[E \frac{1-3\sigma+4\sigma^2}{(2-4\sigma)(1-\sigma)^2} + 4a \frac{(1-2\sigma)^2}{(1-\sigma)^2} + 2b \frac{3-8\sigma+7\sigma^2}{(1-\sigma)^2} + c \right] \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2. \quad (11)$$

Преобразуем правую часть выражения (4), чтобы использовать его для двухосного сжатия-растяжения:

$$\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)_{\text{двух.}} = \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)_{\text{всес.}} \frac{1-\sigma}{1-2\sigma}.$$

Подставляя данное соотношение в (6), получим

$$4a(1-2\sigma)^2 + b(6-16\sigma+14\sigma^2) + c(1-\sigma)^2 = -\frac{3}{2}E(K'+1/3)(1-2\sigma) - E \frac{1-3\sigma+4\sigma^2}{2-4\sigma}. \quad (12)$$

В таблице 2 представлены значения модулей упругости третьего порядка, рассчитанные по уравнениям (7), (10), (12) для различных металлов.

Для определения модулей упругости третьего порядка в сплавах, используемых в ядерной энергетике, необходимо иметь данные по всестороннему сжатию этих материалов, тогда по приведенной методике можно находить значения этих модулей. В случае, когда сплав состоит из основного металла с небольшими добавками других компонентов, в первом приближении можно использовать данные, приведенные в табл. 2. Например, сталь 09Г2С и сталь 3 на 97% состоят из Fe, поэтому сравним значения постоянных третьего порядка, полученные в [10, 13] для этих сталей, с аналогичными значениями для Fe (табл. 3). Согласно табл. 3, значения модулей a , b , c , рассчитанные в работе для Fe, применимы для стали 09Г2С и стали 3 в первом приближении.

Таблица 2

Модули упругости второго и третьего порядков

Металл	σ	K'	$E, 10^{11}$ Па	$a, 10^{11}$ Па	$b, 10^{11}$ Па	$c, 10^{11}$ Па
Al	0,31	3,165	0,9	-0,958	-0,52	-1,488
V	0,36	18,24	1,171	-10,528	-2,278	-5,458
W	0,3	19,1	3,601	-19,334	-7,863	-26,656
Gd	0,26	4,77	0,511	-0,504	-0,357	-1,462
Fe	0,28	7,789	2	-3,688	-2,059	-7,678
Au	0,4	6,51	0,998	-5,045	-1,042	-1,453
Cd	0,3	4,083	0,568	-0,697	-0,375	-1,176
Co	0,32	17,327	1,805	-10,567	-3,55	-10,747
Mg	0,35	4,759	0,302	-0,673	-0,236	-0,517
Cu	0,38	4,01	1,087	-2,777	-0,856	-1,356
Mo	0,31	13,288	2,885	-11,9	-4,574	-14,475
Nd	0,28	3,016	0,429	-0,336	-0,228	-0,805
Ni	0,35	16,58	1,622	-12,045	-2,965	-7,509
Nb	0,39	14,5	0,952	-9,352	-1,512	-2,808
Pb	0,45	3,744	0,127	-0,81	-0,195	-0,084
Ag	0,37	4,681	0,864	-2,303	-0,701	-1,275
Ta	0,35	3,842	1,817	-3,319	-1,27	-2,696
Ti	0,33	3,355	1,115	-1,497	-0,694	-1,713
Zn	0,33	3,264	0,645	-0,807	-0,391	-1,002
Zr	0,35	3,142	0,926	-1,406	-0,589	-1,213

Таблица 3

Модули упругости третьего порядка

Металл	a , ГПа	b , ГПа	c , ГПа
Ст. 3 [13]	-310	-390	-820
Ст. 09Г2С [10]	-313	-303	-769
Fe	-369	-206	-768

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Для случая всестороннего сжатия компоненты тензоров напряжений и деформаций равны, тогда из уравнений (3) для C_{xx} и C_{xy} получим

$$\rho C_{xx}^2 = \lambda + 2\mu + \left(\frac{\sigma_{xx}^0}{3K} + \alpha(T - T_0) \right) (2\lambda + 4\mu + 6a + 10b + 2c); \quad (13a)$$

$$\rho C_{xy}^2 = \mu + \left(\frac{\sigma_{xx}^0}{3K} + \alpha(T - T_0) \right) (2\mu + 3b + c) + \sigma_{xx}^0. \quad (13b)$$

Как видно из рис. 1, наблюдается хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных для температуры 26°C по соотношению (13a) и по [11, 14]. Соот-

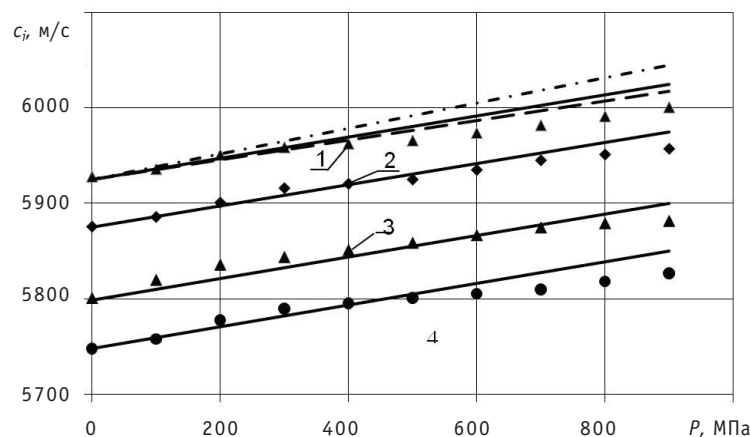


Рис. 1. Зависимость продольной скорости ультразвука от давления всестороннего сжатия и температуры: 1 – 26°C; 2 – 100°C; 3 – 200°C; 4 – 300°C (данные [17]); — — — — расчет авторов по (13а); - · - · - расчет по [14]; - - - - расчет по [11]

ношение (13а) позволяет учитывать влияние температуры и давления на величину скорости ультразвуковых волн, в то время как методики [11] и [14] – только влияние давления.

В случае отсутствия напряжения из уравнений (13) можно получить зависимость модулей второго порядка от температуры:

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha(2\lambda_0 + 6a + 4b)(T - T_0); \quad \mu = \mu_0 + \alpha(2\mu_0 + 3b + c)(T - T_0), \quad (14)$$

где λ_0 и μ_0 – значение модулей второго порядка при $T = T_0$.

При одноосном упругом сжатии-растяжении по оси x напряжением σ_{xx} выражения для значений скорости продольных волн, параллельных и перпендикулярных приложенному напряжению, согласно уравнениям (3), имеют вид

$$\rho c_{xx}^2 = \lambda + 2\mu + \alpha(2\lambda + 4\mu + 6a + 10b + 2c)(T - T_0) + \frac{\sigma_{xx}^0}{3K} \left(-\frac{\lambda^2 + 2\mu\lambda}{\mu} + 2a + 2b \frac{2\lambda + 3\mu}{\mu} + 2c \frac{\lambda + \mu}{\mu} \right); \quad (15a)$$

$$\rho c_{yy}^2 = \lambda + 2\mu + \alpha(2\lambda + 4\mu + 6a + 10b + 2c)(T - T_0) + \frac{\sigma_{xx}^0}{3K} \left(\frac{(\lambda + 2\mu)^2}{2\mu} + 2a - 2b \frac{\lambda - \mu}{\mu} - c \frac{\lambda}{\mu} \right). \quad (15b)$$

Сравним изменения скоростей упругих волн, рассчитанных в работе по модулям a, b, c , с данными, полученными из эксперимента в работах [11, 14] при $T = T_0$. Рассчитанное изменение безразмерных разностей скоростей продольных волн $(C_{xx} - C_{xx0})/C_{xx0}$, параллельных приложенному напряжению, представлено на рис. 2. Как видно из этого рисунка, расчет по соотношениям (15а) удовлетворительно согласуется с расчетами по [10, 13]. Для продольных волн, перпендикулярных приложенному напряжению, изменение безразмерных разностей скоростей $(C_{yy} - C_{yy0})/C_{yy0}$ незначительное – на порядок меньше значений $(C_{xx} - C_{xx0})/C_{xx0}$.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Обзор методов определения напряженного состояния тел для одноосного и двухосного состояний представлен в [11, 13, 18] по упрощенным моделям. Представляет интерес рассмотреть метод определения напряженного состояния, зак-

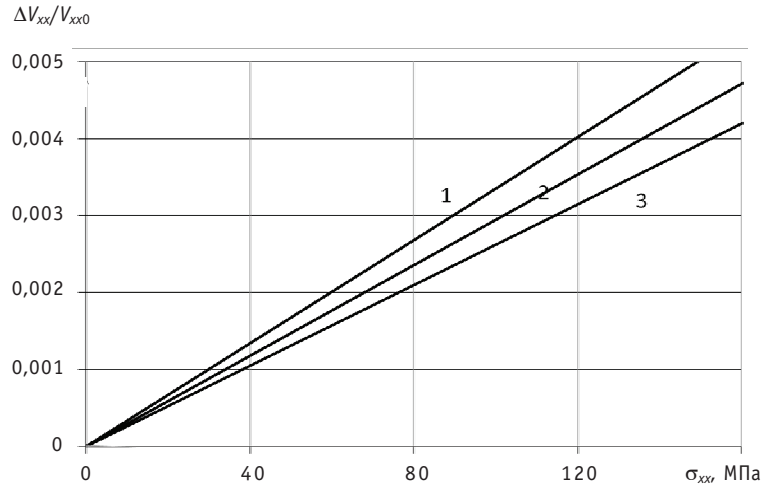


Рис. 2. Изменение скорости $(C_{xx} - C_{xx0})/C_{zz}$ продольных волн для стали 09Г2С при одноосном напряжении σ_{xx} : 1 – расчет по [14]; 2 – расчет авторов по уравнению (15а); 3 – расчет по [11]

лучающийся в применении акустических уравнений (3), полученных на основании системы уравнений (1), (2). Система уравнений (3) является линейной относительно напряжений, температуры и деформаций и позволяет определить главные напряжения, деформации и температуру в элементах оборудования АЭС.

Из уравнений (13) получим соотношение для определения давления и температуры в случае всестороннего равномерного сжатия:

$$P = \frac{(\lambda + 2\mu)(2\mu + 3b + c)}{2\lambda + 4\mu + 6a + 10b + 2c} \frac{C_{xx}^2 - C_{xx}^{02}}{C_{xx}^{02}} - 2\mu \frac{C_{xy}^2 - C_{xy}^{02}}{C_{xy}^{02}}; \quad (16a)$$

$$T = T_0 + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{(\lambda + 2\mu)}{2\lambda + 4\mu + 6a + 10b + 2c} \frac{C_{xx}^2 - C_{xx}^{02}}{C_{xx}^{02}} + \frac{P}{3K} \right). \quad (16b)$$

При одноосном напряженном состоянии тела, в котором напряжение σ_{xx}^0 приложено по оси x , а температура тела равна T , из уравнений (15) получим

$$\sigma_{xx}^0 = \frac{C_{xx}^2 - C_{yy}^2}{C_{xx}^{02}} (\lambda + 2\mu) / \left(\frac{2b}{\mu} + c \frac{2\lambda + \mu}{3K\mu} - \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu} \right); \quad (17a)$$

$$T = T_0 + \frac{\left((\lambda + 2\mu) \frac{C_{xx}^2 - C_{xx}^{02}}{C_{xx}^{02}} + \frac{\sigma_{xx}^0}{3K} \left(\frac{\lambda^2 + 2\mu\lambda}{\mu} - 2a - 2b \frac{2\lambda + 3\mu}{\mu} - 2c \frac{\lambda + \mu}{\mu} \right) \right)}{(2\lambda + 4\mu + 6a + 10b + 2c) / \alpha}. \quad (17b)$$

Из системы уравнений (3) можно использовать и другие варианты определения одноосного напряжения и температуры тела по значениям скоростей акустических волн в элементах оборудования АЭС.

Для определения двухосного напряженного состояния и температуры можно измерять три продольные скорости и по системе уравнений (3) рассчитывать напряжения и температуру элементов конструкций АЭС. Если температура тела известна, то можно использовать измерения двух продольных скоростей распространения упругих волн. Примем для двухосного процесса сжатия-расширения $\sigma_{xx}^0 = 0$, $\sigma_{zz}^0 \neq 0$ и $\sigma_{yy}^0 \neq 0$, тогда из уравнений (3) получим

$$\begin{aligned}\sigma_{yy}^0 &= E\rho(C_{yy}^2 - C_{xx}^2)/(4b+2c)/(1+\sigma), \\ \sigma_{zz}^0 &= E\rho(C_{zz}^2 - C_{xx}^2)/(4b+2c)/(1+\sigma).\end{aligned}\quad (18)$$

Для определения двухосного напряженного состояния тела можно рассмотреть и другие варианты, которые предоставляются системой уравнений (3).

Если тело подвержено начальным напряжениям по трем осям, то они могут быть определены из линейной системы уравнений (3) для продольных и поперечных волн. Систему (3) можно упростить, если рассмотреть квадраты разностей скоростей:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^0 - \sigma_{yy}^0 &= E\rho(C_{xx}^2 - C_{yy}^2)/(4b+2c)/(1+\sigma); \\ \sigma_{xx}^0 - \sigma_{zz}^0 &= E\rho(C_{xx}^2 - C_{zz}^2)/(4b+2c)/(1+\sigma); \\ \sigma_{yy}^0 - \sigma_{zz}^0 &= E\rho(C_{yy}^2 - C_{zz}^2)/(4b+2c)/(1+\sigma); \\ \sigma_{yy}^0 - \sigma_{zz}^0 &= E\rho(C_{xy}^2 - C_{xz}^2)/(\mu+c/2)/(1+\sigma); \\ \sigma_{xx}^0 - \sigma_{yy}^0 &= E\rho(C_{zx}^2 - C_{zy}^2)/(\mu+c/2)/(1+\sigma); \\ \sigma_{xx}^0 - \sigma_{zz}^0 &= E\rho(C_{yx}^2 - C_{yz}^2)/(\mu+c/2)/(1+\sigma).\end{aligned}\quad (19)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый метод определения модулей третьего порядка, основанный на уравнениях нелинейной теории упругости и экспериментальных данных по всестороннему сжатию Мурнагана. Рассчитаны значения модулей упругости третьего порядка a , b и c для различных металлов.

Получено хорошее согласие расчетных значений скорости продольных акустических волн из уравнений, выведенных авторами, с экспериментальными данными. Впервые представлены акустические уравнения для определения напряженного состояния металла оборудования АЭС, которые позволяют учитывать изменение температуры, деформации объемов, площадок и отрезков в начально-деформированной среде.

Литература

1. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
2. Богатов С.В., Куреев М.Г. Методика и результаты эксплуатационных расчетов температуры топлива в твелах ТВС реактора БН-600//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 2. – С. 127-135.
3. Овчинников Ф.Я., Воронин Л.М., Самойлов С.Н. и др. Эксплуатация реакторных установок ВВЭР-1000. – М.: Атомиздат, 1972. – 164 с.
4. Абрамов М.А., Авдеев В.И., Адамов Е.О. и др. Канальный ядерный реактор РБМК/Под общ. ред. Ю.М. Черкашова. – М.: – ГПУНИКИЭТ, 2006. – 632 с.
5. Трофимов А.И., Минин С.И., Трофимов М.А. Методы контроля и снятия напряжений в основном металле и сварных соединениях АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 270 с.
6. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. – М.: Гостехиздат, 1948. – 212 с.
7. Новожилов В.В. Теория упругости. Судпромгиз. – Л.: 1958. – 370 с.
8. Худаско В.В., Трофимов А.И., Куркин С.А. К вопросу об определении скоростей акустических волн в металле элементов энергетического оборудования АЭС при напряжениях/ХI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 29 сентября-2 октября 2009 г.): Тез. докл. Том 2. – Обнинск, 2009. – С. 96-97.

9. Трофимов А.И., Худаско В.В., Куркин С.А., Трофимов М.А. К вопросу о контроле напряженного состояния металла элементов оборудования АЭС/ХI Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 29 сентября-2 октября 2009 г.): Тез. докл. Том 2. – Обнинск, 2009. – С. 94-95.
10. Худаско В.В., Трофимов А.И., Куркин С.А., Лобанов А.Ю. Определение напряженного состояния металла АЭС акустическим методом/ХII Международная конференция «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 4-7 октября 2011 г.): Тез. докл. – Обнинск, 2011. – С. 118-119.
11. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – Киев: Наукова думка, 1977. – 151 с.
12. Hughes. D.S., Kelly J.L. Second-order elastic deformation of solids//Phys. Rev. – 1953. – 92. – № 2. – P. 141-146.
13. Бражников Н.И. Ультразвуковые методы. – М.-Л.: Изд-во «Энергия», 1965.
14. Савин Г.Н. и др. Распространение упругих волн в твердом теле в случае нелинейно-упругой модели сплошной среды//Прикладная механика. – 1970. – Т. VI. – Вып. 2. – С. 38-42.
15. Физические величины. Справочник/Под ред. акад. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
16. Сталь и сплавы. Марочник/Под ред. В.Г. Сорокина, М.Н. Гервасьева. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
17. Hughes D.S. and Maurette M. Dynamic Moduli of Iron, Aluminum, and Fused Quarz//Journal of Applied Physics. – 1956. – V. 27. – № 10. – P. 1184-1186.
18. Никитина Н.Е., Козачек С.В. Преимущества метода акустоупругости для неразрушающего контроля механических напряжений в деталях машин//Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 4(32). – С. 18-28.

Поступила в редакцию 24.10.2012

УДК 621.039.586

Innovative Ultrasonic Technology to Improve the Life of NPP Equipment at its Manufacturing \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, Y.A. Kirillov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 7 pages, 11 illustrations. – References, 2 titles.

Provides a theoretical and experimental justification for the effects of ultrasound on the welds during welding equipment of nuclear power plants. As a result of exposure to ultrasound metal structure welding seam is fine-grained and homogeneous, excludes internal voltage in metal, is removal of residual stresses in in parajoint zone. This leads to a significant increase in strength characteristics and resource equipment of nuclear power stations. Impact of ultrasound technology are in the process of welding and surfacing.

УДК 621.039.586: 531.78.781

To Definition of the Tension of Metal Elements of the Power Equipment of the Nuclear Power Plants Acoustic Method \V.V. Hudasko, A.I. Trofimov, S.A. Kurkin, V.G. Malynkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 3 tables, 2 illustrations. – References, 18 titles.

In work the new acoustic method of definition of a tension of metal of elements of the equipment of the nuclear power plant is presented: based on effect акустоупругости; I consider-shchy deformation of microplatforms and micropieces; using more exact, than sushchest-vuet a method of definition of modules of the third order. This method allows to raise accuracy of measurement of a tension of metal of elements of the equipment of the atomic power.

УДК 621.039.58: 519.23/25

A Method for Detecting Failure Data Flow Heterogeneity of Nuclear Power Plant Equipment in Failure Flow \V.A. Chepurko, S.V. Chepurko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 9 pages, 5 tables, 2 illustrations. – References, 14 titles.

Describes the methodology that allows to evaluate the non-homogeneity parameter flow of failures of NPP equipment. Along with the point estimate of the reliability index, an algorithm of constructing its interval estimate allows you to check the statistical significance of hypotheses about the parameter. Algorithm is described in detail the decision criterion with a prescribed level of significance. Analyzed a number of test cases. To detect heterogeneity, processed real data on failures of recharge and boron control NPP VVER-1000 5 unit Novovoronezh.

УДК 532.526.4: 621.039.534

Validation of the Volume Flow Rate Measurements of RBMK Technological Channels Obtained with the «Shadr-32M» Flowmeter \E.F. Avdeev, V.I. Belozarov, A.Ya. Ustyuzhanin, V.V. Maximovsky, N.D. Rasenkov, N.E. Yushenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 6 pages, 1 table, 2 illustrations. – References, 6 titles.

The experimental data are processed for a set of «Shadr-32M» flowmeters used at Kursk NPP. The data are obtained for different coolant temperatures. The work is done to obtain a correlation between the measured flow rate and the actual one.

УДК 621.039.53

Optimization of the Welding Process Equipment and Piping Plant by Modeling of Welded Joints \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.A. Trofimov, D.A. Egorov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 5 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.

Presented by the simulation of the thermal cycle of welding process on the example program SYSWELD. Modelling to optimize the welding process, including taking into account the effects of ultrasound, which will increase the strength properties of welded joints of NPP equipment.

УДК 621.039.534

Experimental Study of the Origin and Characteristics of Gas Flow in Cavitation Lead Coolant Innovative Nuclear Fast Reactor \A.V. Beznosov, P.A. Bokov, A.V. Lvov, O.O. Novozhilova, E.G. Novinsky, V.V. Lemekhov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2012. – 10 pages, 6 illustrations. – References, 1 title.