

УДК 621.039.586

## ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ СРЕДЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ

Яськив В.М.

ФГБОУ ВПО «Научно-исследовательский университет «Московский энергетический институт»,  
Москва, e-mail: vadimyaskiv@yandex.ru

Опыт эксплуатации атомных электрических станций (АЭС) с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) показал, что возможны повреждения как коллектора ввода/вывода теплоносителя, так и трубного пучка. В 1986 г. были обнаружены повреждения стали марки 10ГН2МФА перфорированной зоны коллекторов вывода теплоносителя, а с 1998 года регистрируется растрескивание в зоне приварки коллекторов к корпусу парогенератора (ПГ). Одновременно весьма актуальной является проблема повреждения теплообменных труб (ТОТ). При исчерпании технологического запаса ТОТ возникает необходимость замены ПГ или принятия решения по продолжению эксплуатации блока на пониженном уровне мощности. Это приводит к понижению коэффициента использования установленной мощности. И, как первый, так и второй случай сопровождается значительными экономическими потерями. Следует подчеркнуть сложные условия службы конструкционных сталей при эксплуатации: наличие высоких растягивающих напряжений и их колебания, высокие температуры тепловых нагрузок со значительной частотой теплосмен, действие на металл коррозионной среды и накипеобразования. По этим причинам коррозионное растрескивание конструкционных сталей энергоустановок часто является суммарным результатом протекания других видов локальной коррозии, не обязательно последовательного, а скорее параллельного и одновременного.

**Ключевые слова:** компоненты среды, коэффициент интенсивности напряжений, коррозия, долговечность, прочность, нагрузки, дефекты металла, влияние водорода, охрупчивание

## INFLUENCE OF MEDIUM COMPONENTS ON THE STRESS INTENSITY FACTOR IN METALS

Yaskiv V.M.

FSBEI HPE «Scientific research University «Moscow power engineering Institute»,  
Moscow, e-mail: vadimyaskiv@yandex.ru

Experience of operating nuclear power plants (NPP) with pressurized water reactor (PWR) showed that could be damage to both the collector of the input/output of the coolant and the tube bundle. In 1986 there were damages of the steel the steam generator perforated zone of the collectors of the output of the coolant, and in 1998 recorded the cracking in the welding zone of the reservoir to the body of the steam generator (SG). At the same time a very urgent problem of damage to the heat exchange tubes (HET). In case of exhaustion of the technological margin of HET there is a need to replace the SG or the decision on the continued operation of the unit at a reduced power level. This leads to the decrease of the coefficient of use of installed capacity. And, both the first and the second case is accompanied by significant economic losses. It should be note that conditions of service of structural steels during operation is: complex of high tensile stresses and vibrations, high temperatures of heat loads with a significant frequency of thermal cycles, the effect on metal corrosion environment and scale formation. For these reasons, stress corrosion cracking of structural steels power plants is often the cumulative result of the flow of other types of local corrosion, not necessarily consecutive, but rather parallel and simultaneous.

**Keywords:** components of environment, the stress intensity factor, corrosion, service life, strength, loads, defects in the metal, the influence of hydrogen, embrittlement

Напряженное состояние металла определяется тремя параметрами: расстоянием  $r$  от начала координат до рассматриваемой точки, углом  $\theta$  и параметрами  $K_I$ ,  $K_{II}$  или  $K_{III}$  (рис. 1). Эти параметры носят название коэффициентов интенсивности напряжений. Они зависят от формы тела, внешних нагрузок, расположения и длины трещин.

Анализ прочности и долговечности детали с трещиной при циклическом нагружении в рамках линейной механики разрушения состоит из следующих этапов [7]:

- определение формы, размера и местоположения наиболее опасных исходных трещиноподобных дефектов;

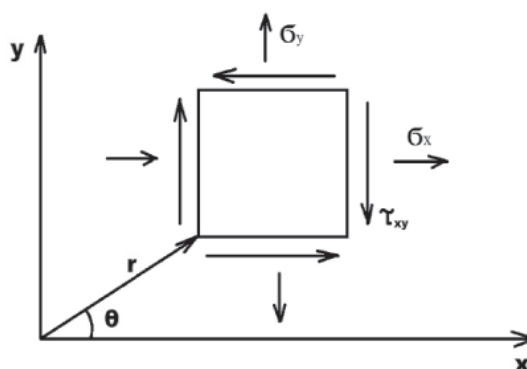


Рис. 1. Система координат и компоненты напряжений у кончика трещины

- определение напряженно-деформируемого состояния детали с детальным анализом поля напряжений вблизи трещин и определением коэффициентов интенсивности напряжений;

- выбор критерия локального разрушения на фронте трещины, изучение докритического развития трещины и отыскание критического (предельного) состояния, которое соответствует выходу конструкции на нерасчетный режим (например, разрушение).

Вычисленное значение наибольшего коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  (как определенной функции нагрузок, размеров тела и длины начальной трещины) приравнивается некоторому критическому значению этого коэффициента, характеризующему сопротивление материала отрыву на фронте трещины нормального разрыва. Получается критерияльная зависимость, связывающая допускаемые величины внешних нагрузок, длин трещин, внутренних напряжений, температурных градиентов и т.д. В случае устойчивого развития хрупких трещин эта зависимость служит для определения длины трещины.

Таким образом, одна из основных задач, стоящих перед механикой разрушения в связи с расчетом на прочность, состоит в определении коэффициента интенсивности напряжений, непосредственное влияние на который оказывает коррозионная среда.

Определим коэффициент интенсивности напряжений с учетом влияния водорода.

Рассмотрим развитие трещины последовательными скачками, величина которых значительно больше раскрытия трещины  $2v_0$  в ее конце. Таким образом, для определения концентрации протонов водорода  $c$  приходим к следующей краевой задаче математической физики: в конце неподвижного полубесконечного прямолинейного разреза в твердом теле вдоль  $y = 0$ ,  $x < 0$  в начальный момент времени  $t = 0$  включается постоянно действующий точечный источник протонов интенсивности  $Q$ . Предполагается, что величина  $Q$  не зависит от времени, а берега разреза свободны от нагрузок. Требуется найти распределение концентрации протонов в теле.

Уравнение, описывающее процесс диффузии протонов, имеет вид [7]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (1)$$

при  $0 < r < \infty$ ,  $0 < t < \infty$  ( $r^2 = x^2 + y^2$ ), где  $D$  – коэффициент диффузии водорода в металле.

Уравнение сохранения массы [5]:

$$Qt = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} r c dr d\Theta = 2\pi \int_0^{\infty} r c(r, t) dr \quad (2)$$

играет роль дополнительного условия (при  $r \rightarrow \infty$  величина  $c$  стремится к нулю).

Решение этой задачи имеет следующий вид [5]:

$$c = -\frac{Q}{4\pi D} Ei \left( -\frac{r^2}{4Dt} \right). \quad (3)$$

Здесь  $Ei(x) = \int_{-\infty}^x \left( \frac{1}{t} \right) e^t dt$  – интегральная показательная функция. Напомним, что функция  $-Ei(-x)$  при положительных  $x$  монотонно убывает, причем имеют место следующие асимптотические формулы:

при  $x \rightarrow 0$   $-Ei(-x) = -\ln x - C$  ( $C \approx 0,577$  – постоянная Эйлера);

при  $x \rightarrow \infty$   $-Ei(-x) = e^{-x}/x$ .

Вследствие диффузии протонов вблизи конца трещины внутри пластической области образуется круговая область охрупченного металла, который ведет себя как упругое тело «упругое ядро» (рис. 2).

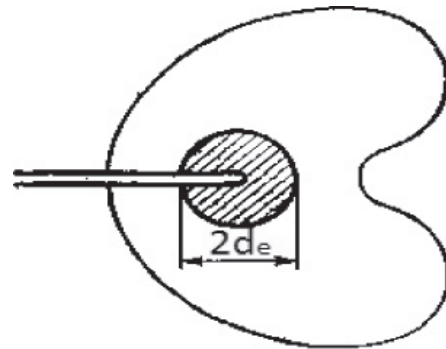


Рис. 2. «Упругое ядро»

Охрупчивающее действие протонов на металл определяется их концентрацией; поэтому будем считать для простоты, что, пока концентрация  $c$  меньше некоторой критической величины  $c_e$ , металл остается в пластическом состоянии, а как только величина  $c$  превысит значение  $c_e$ , металл переходит в упруго-хрупкое состояние.

При этом радиус охрупченного кругового ядра  $d_e$  находится по формуле (3) из условия:

при  $r = d_e$   $c = c_e$ .

Отсюда

$$\frac{4\pi D c_e}{Q} = -Ei \left[ \frac{-d_e^2}{4Dt} \right]. \quad (4)$$

Таким образом, величина  $d_e$  монотонно растет во времени.

Так как радиус упругого ядра гораздо больше раскрытия трещины, вблизи конца трещины формируется структура, характерная для математических разрезов в упругих телах.

Эта структура вполне характеризуется локальным коэффициентом интенсивности напряжений  $k_I$ .

Найдем локальный коэффициент интенсивности  $K_I$ . Он определяется из решения плоской задачи теории упругости для круговой области радиуса  $d_e$  с радиальным разрезом; на границе круга заданы нормальные и касательные нагрузки, зависящие только от параметра  $\sigma_s$ . Объемные силы в упругом ядре также зависят только от параметра  $\sigma_s$ .

Следовательно, коэффициент  $K_I$  из соображений анализа размерностей равен

$$K_I = \eta_1 \sigma_s \sqrt{d_e}. \quad (5)$$

Здесь  $\eta_1$  – некоторое постоянное число (в принятой постановке задачи оно не зависит обычно даже от коэффициента Пуассона или отношения  $\sigma_s/E$  и в принципе всегда может быть найдено, если известно решение соответствующей упруго-пластической задачи).

Интенсивность  $Q$  прямо пропорциональна величине раскрытия трещины в ее конце [7]:

$$Q = \eta v_0, \quad (6)$$

так как свежая поверхность обнажающегося вследствие пластической деформации металла, очевидно, пропорциональна  $v_0$ . Коэффициент  $\eta$  зависит от среды и от адсорбционной активности по отношению к водороду контакта свежий металл – среда.

Раскрытие  $v_0$  трещины равно

$$v_0 = \frac{\eta_2 K_I^2}{E \sigma_s}, \quad (7)$$

( $\eta_2$  – некоторое число).

$$2v_0 = \frac{0,42 K_I^2}{E \sigma_s}, \quad (8)$$

$$\eta_2 = 0,21.$$

Сравнивая с (6), получаем

$$Q = \frac{\eta \eta_2 K_I^2}{E \sigma_s}. \quad (9)$$

Сравнивая с (3), в итоге получаем, что коррозионная среда имеет непосредственное влияние на коэффициент интенсивности напряжений:

$$C(t) = -\frac{\eta \eta_2 K_I^2 / (E \sigma_s)}{4\pi D} Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right); \quad (10)$$

$$K_I = \sqrt{\frac{C(t) 4\pi D E \sigma_s}{\eta \eta_2 Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)}}, \quad (11)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести на растяжение, кг/мм<sup>2</sup>;  $E$  – модуль Юнга, Н/мм<sup>2</sup>;  $K_I$  – КИН, Н/мм<sup>3/2</sup>;  $\eta_2 = 0,21$ .

Коэффициент диффузии водорода в металлах  $D$  зависит от абсолютной температуры  $T$ , так [2]:

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{U}{RT}\right]. \quad (12)$$

Здесь  $U$  – энергия активации процесса;  $D_0$  – некоторая постоянная металла. Величины  $D_0$  и  $U$  для стали изменяются в пределах:  $D_0 = 10^{-2} - 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с;

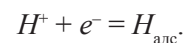
$U = 3 - 9$  ккал/(г·атом);  $Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)$  – инте-

гральная показательная функция;  $C_H(t)$  – концентрация водорода, мг/кг.

Контакт с внешней средой и приложенное действие растягивающих механических напряжений вынуждает дислокационную структуру к перестройке, в результате чего происходит выход дислокаций на границу раздела металл/коррозионная среда и образование ступеньки скольжения с высотой, кратной вектору Бюргера (рис. 3). При этом ступеньки скольжения образуют анодную и катодную поверхности. Анодный процесс инициирует водородную деполяризацию и абсорбцию водорода металлом [1].

А это приводит к дополнительным растягивающим напряжениям в кристаллической решетке конструкционного материала и водородной хрупкости.

Именно площадки ступенек скольжения определяют скорость растворения дислоцированных атомов и число перешедших на катод валентных электронов. В свою очередь, электроны соединяются с протонами и образуют адсорбированные атомы водорода:



Чем больше площадь ступенек скольжения, тем выше скорость генерации атомарного водорода, адсорбирующегося на границе раздела металл/коррозионная среда на металле. Большая часть адсорбированного водорода объединяется в молекулы газа водорода, а меньшая – поглощается объемом металла (рис. 4) [1].

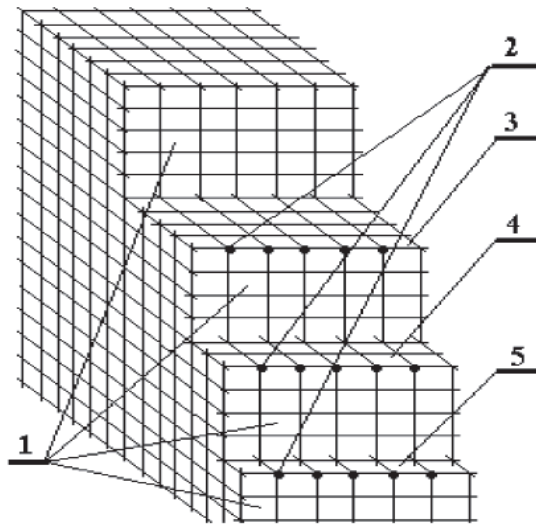


Рис. 3. Схема образования ступенек скольжения на границе раздела «металл/коррозионная среда»: 1 – границы раздела «металл/коррозионная среда»; 2 – дислоцированные атомы в ступеньке скольжения; 3, 4, 5 – ступеньки скольжения с высотами 4b, 2b и 1b

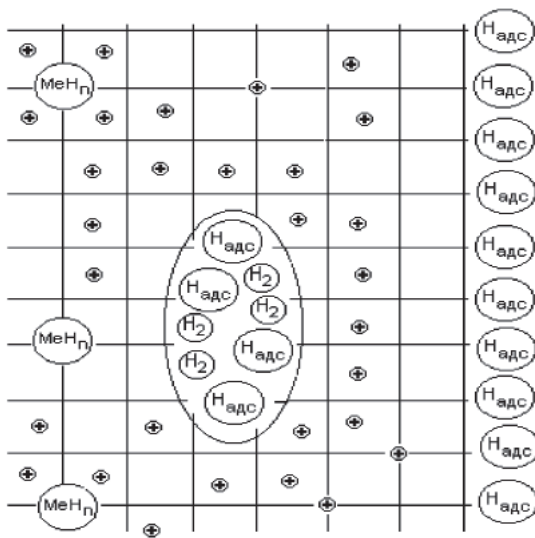


Рис. 4. Формы существования адсорбированного водорода  
 $H_{адс}$  – адсорбированный водород;  
 $H_2$  – молекулярный водород;  $A$  – протон;  
 $MeH_n$  – гидрид металла с валентностью  $n$

Наводороживание сталей перлитного класса в деаэрированной воде описывается детерминистским уравнением кинетики

данного процесса, полученным на кафедре АЭС МЭИ (ТУ) [1]:

$$C_H(\tau_i) = k(\tau_{h_i} + \Delta\tau_i)^{0.5} \exp(-qpH_i), \quad (13)$$

где  $k$  и  $q$  – константы, определяемые при обработке данных целевых экспериментов;  $\tau_{h_i}$  – вспомогательный параметр, имеет размерность экспозиции, необходимой для накопления такого же количества водорода, как за весь предшествующий период эксплуатации, но при значении  $pH_i$

$$\tau_{h_i} = \left[ (C_{H_{i-1}}) k^{-1} \exp(-qpH_i) \right]^2, \quad (14)$$

где  $\Delta\tau_i$  – интервал времени наблюдений между двумя последовательными измерениями, в пределах которого все значения фактор-аргументов неизменны.

В настоящее время нет методики описания процесса наводороживания аустенитных хромоникелевых сплавов (АХНС). В рамках данной статьи предлагается следующий алгоритм.

Накопление водорода в сталях аустенитного класса происходит в соответствии с законом Фарадея при извлечении хлорида хрома ( $CrCl_2$ ) из АХНС. Одному заряду хлор-иона ( $Cl^-$ ) при количестве электричества в 96500 Кл соответствует 1 г водорода ( $H^+$ ).

Зная, что аустенитные стали также подвержены водородному охрупчиванию, как и стали перлитного класса, выведем формулу для накопления водорода в стали 08X18H10T.

Для этого преобразуем детерминированное уравнение кинетики наводороживания сталей перлитного класса при кипении воды (13) с учетом концентрирования хлорид-иона в воде при кипении в отложениях на теплообменной трубке.

Из формулы (13) выразим значение  $pH$  при наводороживании в кипящей воде:

$$pH_i = \left[ \frac{-\ln(C_H(\tau_i)/k \sum_i (\tau_{h_i} + \Delta\tau_i)^{0.5})}{q} \right] \quad (15)$$

В выражении, описывающем долговечность АХНС марки 08X18H10T [5]:

$$\ln \tau_{кр} = \ln L - 17,79 - \frac{1}{2} \ln C_{O_2} - \frac{3}{2} \ln C_{Cl^-} + \frac{U_0 - \left( \frac{\sigma}{\sqrt{2}} - \alpha G \bar{b} \sqrt{\rho} \right) N_{\Phi, \text{м}} \gamma}{RT}, \quad (16)$$

где  $\tau_{кр}$  – время до образования сквозной коррозионной трещины, ч;  $L$  – толщина стенки металла, мм;  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода, мг/кг;  $C_{Cl^-}$  – концентрация хлорид-иона, мг/кг;  $U_0$  – энергия активации процесса самодиффузии дислоцированного атома, кДж/моль;  $\sigma$  – суммарное растягивающее механическое напряжение, Н/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коэффициент, который зависит от механизма упрочнения и от сил сопротивления;  $G$  – модуль сдвига, Н/м<sup>2</sup>;  $\bar{b}$  – вектор Бюргера, м;  $\rho$  – плотность дислокаций;  $N_{ф.м}$  – постоянная Авогадро по физической шкале, моль/г·моль;  $\gamma$  – активационный объем, м<sup>3</sup>.

Учтем образование адсорбированного водорода, и, подставив в это выражение значение  $pH$ , получим время до образования сквозной коррозионной трещины.

$$\ln \tau_{кр} = \ln L - 17,79 - \frac{1}{2} \ln C_{O_2} - \frac{3}{2} \ln C_{Cl^-} + \frac{U_0 - \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}} - \alpha G \bar{b} \sqrt{\rho}\right) N_{ф.м} \gamma}{RT} - \frac{pH}{F}, \quad (17)$$

где  $pH$  – водородный показатель (отрицательный десятичный логарифм концентрации ионов водорода);  $F$  – число Фарадея, Кл/моль·эков.

И в конечном итоге, получаем формулу для накопления водорода для стали 08X18H10T:

$$C_H(\tau_i) = \frac{qk \sum_i (\tau_{h_i} + \Delta\tau_i)^{0.5}}{F \left( \tau_{кр} - L - e^{-17,79} - \sqrt{C_{O_2}} - \sqrt{C_{Cl^-}^3} - e^{\frac{U_0 - \left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}} - \alpha G \bar{b} \sqrt{\rho}\right) N_{ф.м} \gamma}{RT}} \right)}. \quad (18)$$

Водород, несомненно, играет важную, но не исключительную роль при коррозионном разрушении под напряжением (КРПН) конструкционных материалов (сталей перлитного и аустенитного классов), т.к. в условиях активного растворения идет интенсивное наводороживание этих сталей. Однако эти процессы могут описывать только определенную часть КРПН.

Итак, основной причиной коррозионно-механических повреждений трубок теплообменной поверхности парогенераторов АЭС с ВВЭР-1000, изготовленных из аустенитной нержавеющей стали, является хлорид-кислородное коррозионное растрескивание [3]. Однако в результате химических отмывок ТОТ от отложений моющими композициями и непреднамеренного заброса ионообменных смол и промывочных рас-

творов из БОУ (блочной обессоливающей установки) с питательной водой в ПГ, а также длительной его эксплуатации при низком числом значении  $pH$  воды продувки происходит наводороживание аустенитной стали марки 08X18H10T. Таким образом, водородная хрупкость также повреждает металл трубчатки ПГ, как и стали марки 10ГН2МФА, из которых изготовлены коллекторы ПГ.

В качестве основного критерия, который определяет повреждаемость элементов ПГ, выбрана трещиностойкость материала. Количественной характеристикой трещиностойкости материала является коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  в вершине трещины. Предложена методика оценки остаточного ресурса трубных пучков и коллекторов для на-

ходящихся в эксплуатации парогенераторов с использованием зависимости  $K_I = f(C_{H_2})$ .

Анализируя полученные результаты, можно отметить, что: коррозионно-активная среда вносит серьезный вклад

в определение напряженно-деформируемого состояния конструкции; в зависимости от уровня водородного показателя интенсивность накопления водорода различна, соответственно, существенно различается и кинетика роста коэффициента интенсивности напряжений; проведение анализа прочности и долговечности конструкций, эксплуатирующихся в сложных условиях, без учета влияния коррозионной среды, но лишь с учетом введения поправочных коэффициентов, зачастую неоправданно. Таким образом, влияя на параметры коррозионной среды (в частности на водородный показатель), можно влиять на срок безаварийной службы оборудования АЭС, что вносит свой вклад в улучшение экономических показателей объекта.

**Список литературы**

1. Акользин П.А., Герасимов В.В., Горбатов В.П. Локальная коррозия металла теплоэнергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1973. – 272 с.

2. Горбатов В.П. Термины и определения: справочное учебное пособие по дисциплине «Физико-химические процессы на АЭС». – М., 2006. – 30 с.

3. Лукасевич Б.И. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных станций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 396 с.

4. Матвиенко Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 309 с.

5. Пинцеш Я. Влияние коррозионного растрескивания на долговечность трубного пучка парогенераторов АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во МЭИ, 1987. – 242 с.

6. Стеклов О.И. Стойкость материалов и конструкций к коррозии под напряжением. – М.: Машиностроение, 1990. – 386 с.

7. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – 640 с.

**References**

1. Akolzin P.A., Gerasimov V.V., Gorbatyh V.P. Lokalnaya korroziya metalla teploenergeticheskogo oborudovaniya. M.: Energoatomizdat, 1973 g. 272 p.

2. Gorbatyh V.P. Terminy i opredeleniya Spravochnoe uchebnoe posobie po discipline «Fiziko-himicheskie processy na AES». M., 2006 g., 30 p.

3. Lukasevich B.I. Parogeneratory reaktornyh ustanovok VVER dlya atomnyh stancij. M.: IKC «Akademkniga», 2004., 396 p.

4. Matvienko Y.U. G. Modeli i kriterii mekhaniki razrusheniya. M.: FIZMATLIT, 2006 g., 309 p.

5. Pincesh Y.A. «Vliyaniye korrozionnogo rastreskivaniya na dolgovechnost trubnogo puchka parogeneratorov AES s VVER». Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. M.: Izd-vo MEI, 1987 g. 242 p.

6. Steklov O.I. Stojkost materialov i konstrukcij k korrozii pod napryazheniem. M.: Mashinostroenie, 1990 g., 386 p.

7. Cherepanov G.P. «Mekhanika hrupkogo razrusheniya». M.: izd. «NAUKA», 1974 g. 640 p.

**Рецензенты:**

Парфенов Ю.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой АЭС НИУ МЭИ, ФГБОУ ВПО «Научно-исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва;

Горбатов В.П., д.т.н., профессор, преподаватель кафедры АЭС НИУ МЭИ, ФГБОУ ВПО «Научно-исследовательский университет «Московский энергетический институт», г. Москва.