

УДК (UDC) 620.193.1:621.165

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЭРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ
МАТЕРИАЛОВ В ТЕЧЕНИЕ ИНКУБАЦИОННОГО ПЕРИОДА КАПЛЕУДАРНОГО
ИЗНАШИВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЦЕПИ МАРКОВА****MODELING THE ACCUMULATION OF EROSION DAMAGE TO MATERIALS
DURING THE INCUBATION PERIOD OF DROPLET IMPACT WEAR USING
A MARKOV CHAIN**

Лагереv А.В.

Lagerev A.V.

Российский университет транспорта (Москва, Россия)
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Каплеударное воздействие со стороны двухфазных потоков рабочего тела и вызываемого им эрозионного изнашивания твердых поверхностей конструктивных элементов наблюдается в процессе эксплуатации различного ответственного оборудования - паровых и влажнопаровых турбин, энергетических установок космических и летательных аппаратов, трубопроводов влажного пара и др. Кинетика потери материала поверхностью эродирующих элементов характеризуется неравномерностью и наличием нескольких характерных периодов изнашивания. Практический интерес представляет собой прогнозирования начального периода эрозионного изнашивания – инкубационного периода, в течение которого происходит кумулятивное накопление эрозионно-усталостных повреждений микроструктуры материала поверхностного слоя конструктивных элементов без видимого уноса материала. Продолжительность инкубационного периода во многом определяет дальнейшую кинетику каплеударного изнашивания, в частности, интенсивности износа в течение периодов максимальной и установившейся скорости потери материала. В статье представлена методика моделирования процесса накопления эрозионных повреждений в материале поверхностного слоя конструктивных элементов в течение инкубационного периода. Методика позволяет учесть вероятностную природу исследуемого явления. С этой целью процесс накопления повреждений моделируется цепью А.А. Маркова. Методика также позволяет в вероятностном аспекте прогнозировать продолжительность инкубационного периода эрозионного изнашивания с учетом режима работы оборудования и количественных параметров каплеударного воздействия.

Ключевые слова: эрозия, каплеударное изнашивание, инкубационный период, моделирование.

Дата получения статьи:

05.01.2026

Дата принятия к публикации:

08.02.2026

Дата публикации:

25.03.2026

Abstract. The droplet impact effect from the two-phase flows of the working fluid and the erosive wear of the hard surfaces of structural elements caused by it is observed during the operation of various critical equipment - steam and wet-steam turbines, space and aircraft power plants, wet steam pipelines, etc. The kinetics of material loss from the surface of eroding elements is characterized by irregularity and the presence of several distinct wear stages. Of practical interest is predicting the initial stage of erosive wear, the incubation period, during which a cumulative buildup of fatigue damage occurs in the microstructure of the material in the surface layer of structural elements, without visible material removal. The duration of the incubation period largely determines the further kinetics of droplet impact wear, in particular, the intensity of wear during periods of maximum and steady-state material loss. The article presents a technique for modeling the accumulation of erosive damage in the material of the surface layer of structural elements during the incubation period. The method takes into account the probabilistic nature of the phenomenon being studied. To do this, the process of damage accumulation is modeled using the Markov chain. This technique also allows for predicting the duration of the erosion wear incubation period in a probabilistic manner, taking into account the operating mode of the equipment and quantitative parameters of drop impact.

Keywords: erosion, droplet impact wear, incubation period, modeling.

Date of manuscript reception:

05.01.2026

Date of acceptance for publication:

08.02.2026

Date of publication:

25.03.2026

Сведения об авторе:

Лагерев Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

**Author's information:**

Alexander V. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Ground transportation and technological facilities» at Russian University of Transport, e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0380-5456>

1. Введение

Эрозионное разрушение поверхности конструктивных элементов различных машин и оборудования, эксплуатирующихся в различных областях техники, в частности, в энергетике, авиа- и ракетостроении, транспорте и др., является в настоящее время одним из основных ограничений при проектировании самых разнообразных энергетических, транспортных и военных систем и одним из основных препятствий для их эффективного функционирования [1-3]. Признанием этого факта явилось сделанное в [4] предложение ввести по аналогии с понятиями теплового и звукового барьеров в развитии авиационной техники и понятие барьера эрозионного.

Отрицательные последствия эрозии связаны с тем, что разрушение и износ материала с поверхности эродирующих элементов обуславливает снижение показателей надежности и экономичности как поврежденных узлов, так и оборудования в целом [2, 5]. Зачастую эрозионное повреждение также провоцирует образование и интенсифицирует ускоренное развитие трещин в конструкциях, так как характерный бороздчато-игольчатый рельеф эродированных поверхностей является значительным концентратором напряжений. Этот факт хорошо виден на примере эрозии турбинного оборудования тепловых, геотермальных и атомных электростанций, а также судовых влажнопаровых турбин [3]. Каплеударное изнашивание наиболее подверженных повреждению рабочих лопаточных аппаратов паровых турбин может снижать коэффициент полезного действия последних турбинных ступеней на 5...9 % (абсолютных) и дополнительно являться инициатором возникновения усталостных трещин в профильных частях рабочих лопаток [6].

Характерной особенностью каплеударного эрозионного изнашивания поверхности конструктивных элементов технологического оборудования является наличие инкубационного периода [7]. В это время в материале поверхностного слоя протекает кумулятивный процесс накопления усталостных микроструктурных повреждений, визуально не фиксируемый средствами наружного обследования. По мере исчерпания способности материала сопротивляться каплеударному воздействию начинается собственно процесс удаления материала с поверхности конструктивного элемента с формированием сначала ускоренной, а затем и установившейся интенсивности изнашивания [8, 9].

2. Математическая модель

Умение прогнозировать продолжительность инкубационного периода каплеударной эрозии представляет значительный практический интерес, так она в сочетании с эрозионно-усталостными свойствами материала определяет ключевую количественную характеристику кинетической кривой эрозионного изнашивания - максимальную скорость $I_{E,max}$ увеличения толщины слоя эродированного материала с течением времени:

$$I_{E,max} = \frac{E_0}{\tau_{inc}}, \quad (1)$$

где τ_{inc} - продолжительность инкубационного периода; E_0 – эрозионно-усталостное свойство материала [5].

На начальной стадии эрозионного изнашивания в пределах интервала времени, соответствующего длительности инкубационного периода каплеударного изнашивания τ_{inc} , единственным количественным показателем эрозии в пределах произвольной микрощапки дискретизации расчетной области поверхности конструктивного элемен-

та выступает величина эрозионно-усталостного повреждения микроструктуры поверхностного слоя, которая необратимо накапливается в течение инкубационного периода:

$$D(\tau) = D_0 + G(d_1, D, \tau), \quad (2)$$

где D_0 - исходная дефектность микроструктуры после механической и термической обработки поверхности конструкции в соответствии с технологией её изготовления и упрочнения.

Оператор суммирования повреждений от отдельных актов эрозионно-ударного нагружения, учитывая результаты стендовых и натуральных экспериментов [10, 11], можно представить в соответствии с линейной гипотезой Польшгрена-Майнера:

$$G(d_1, D, \tau) = \sum_{i=1}^{i=N(\tau)} (d_1)_i,$$

где $N(\tau)$ - число актов нагружения микроплощадки поверхности за интервал времени τ .

Соотношение (2) целесообразно преобразовать к более удобному для расчетов виду, непосредственно введя в выражение для оператора $G(\dots)$ продолжительность ударного воздействия. Для этого следует воспользоваться суммарной величиной эрозионного повреждения материала D_τ за произвольно выбранный промежуток времени $\Delta\tau$ от воздействия частиц эродента всех повреждающих фракций. В результате, для дискретных моментов времени эксплуатации конструктивного элемента $\tau_i = i\Delta\tau$ зависимость (2) примет вид:

$$D(\tau_i) = D_0 + \sum_{j=1}^{j=\frac{\tau_i}{\Delta\tau}} D_{\tau_j}.$$

Показатель $D(\tau)$ нормируется предельной величиной D_k . Согласно современным представлениям о природе усталости материалов, в её качестве выступает накопленное предельное эрозионно-усталостное повреждение, при достижении которого начинается процесс непосредственного разрушения поверхностного слоя конструктивного элемента. С достижением предельной величины D_k связано окончание инкубационного периода эрозии. Его продолжительность определяется условием

$$D(\tau_{inc}) = D_k$$

и зависимостью (2).

Если рассматривать D_k как временную функцию, то возможен учет влияния на продолжительность инкубационного периода τ_{inc} реологических процессов - коррозии и старения материала. Повреждения D_0 и D_k отражают неоднородность микроструктуры материала и по своей сути имеют случайный характер. Однако какие-либо эмпирические данные, позволяющие сделать их количественную оценку, отсутствуют и в будущем получение таких данных также проблематично. Целесообразно ввести случайную величину

$$a_p = D_k - D_0$$

и постулировать нормальный закон её распределения с математическим ожиданием \bar{a}_p и стандартным отклонением S_a . Она представляет собой долю повреждения в D_k , которая непосредственно связана с усталостными процессами в результате ударного воздействия со стороны внешней среды и накапливается в течение инкубационного периода. В результате, вместо двух характеристик материала D_0 и D_k в дальнейшем можно оперировать лишь одной характеристикой, а именно a_p .

Графически процесс накопления эрозионных повреждений микрообъема материала в пределах микроплощадки поверхности конструктивного элемента в соответствии с зависимостью (2) представлен на рис. 1, а. Набор монотонно гладких кинетических кривых $D_i(\tau)$ образует вероятностное семейство выборочных реализаций процесса в течение инкубационного периода эрозии отдельной микроплощадки. Совокупность подобных вероятностных семейств дает статистическую характеристику процесса эрозии исследуемого конструктивного элемента на начальной стадии износа.

Как показано в [12, 13], в общем случае произвольная l -я выборочная реализация изменения во времени случайного по величине показателя эрозии $X_l(\tau)$, способного количественно характеризовать процесс повреждения или износа конструктивного элемента, представляется цепью А.А. Маркова - дискретным набором числовых значений X_ν (состояний ν показателя X) в дискретные мо-

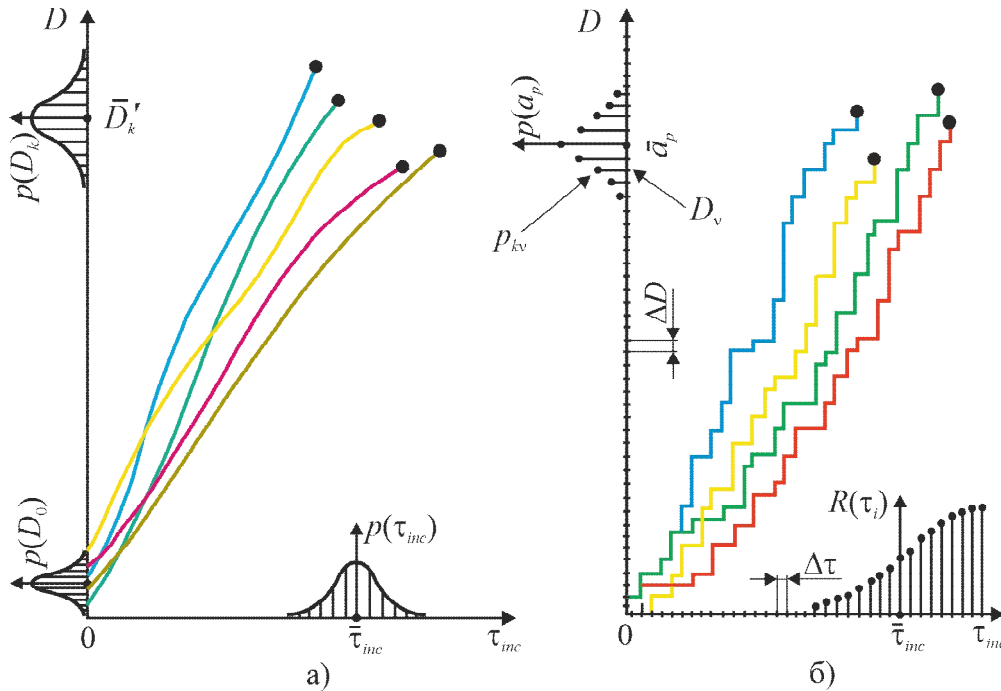


Рис. 1. Вероятностные семейства выборочных реализаций процесса накопления эрозионных повреждений: а – исходное; б – моделируемое цепью А.А. Маркова

менты времени $\tau_i = i\Delta\tau$ ($i = 1, 2, \dots, s$). Искомое вероятностное семейство выборочных кинетических кривых выражается соотношением

$$\begin{aligned} & \{X_l(\tau), \tau \geq 0, l = 1, 2, \dots, N_p\} = \\ & = \{X_l(\tau_0) = x_0; X_l(\tau_1) = x_1; \dots; \\ & X_l(\tau_i) = x_v; \dots; X_l(\tau_j) = x_b; \dots; X_l(\tau_s) = x_m\} \quad (3) \end{aligned}$$

с пространством возможных состояний $\{Q\} = \{0, 1, \dots, v, \dots, b, \dots, m\}$.

Состояние b характеризует собой некое предельно допустимое значение показателя эрозии X_{per} , которое достигается в процессе монотонного увеличения эрозионного повреждения. В отличие от него, состояние m характеризует собой некое критическое по условиям эксплуатации эродирующего конструктивного элемента значение показателя эрозии X_{crit} , которое достигается в процессе внезапного перехода из некоторого промежуточного состояния v . Номера этих состояний определяются зависимостями

$$b = X_{per}/\Delta X \quad \text{и} \quad m = X_{crit}/\Delta X,$$

где ΔX – принятый шаг дискретизации показателя эрозии X .

Течение процесса эрозии, т.е. изменение во времени состояний $\{Q\}$, в общем виде выражается цепью А.А. Маркова, показанной на рис. 2 [12]. Стрелки показывают направление

возможных переходов во времени между двумя последовательными значениями показателя эрозии. В общем случае предусматриваются переходы трех типов:

Состояние b характеризует собой некое предельно допустимое значение показателя эрозии X_{per} , которое достигается в процессе монотонного увеличения эрозионного повреждения. В отличие от него, состояние m характеризует собой некое критическое по условиям эксплуатации эродирующего конструктивного элемента значение показателя эрозии X_{crit} , которое достигается в процессе внезапного перехода из некоторого промежуточного состояния v . Номера этих состояний определяются зависимостями

$$b = X_{per}/\Delta X \quad \text{и} \quad m = X_{crit}/\Delta X,$$

где ΔX – принятый шаг дискретизации показателя эрозии X .

Течение процесса эрозии, т.е. изменение во времени состояний $\{Q\}$, в общем виде выражается цепью А.А. Маркова, показанной на рис. 2 [12]. Стрелки показывают направление возможных переходов во времени между двумя последовательными значениями показателя эрозии. В общем случае предусматриваются переходы трех типов:

Состояние b характеризует собой некое предельно допустимое значение показателя эрозии X_{per} , которое достигается в процессе монотонного увеличения эрозионного повреждения. В отличие от него, состояние m характеризует собой некое критическое по условиям эксплуатации эродирующего конструктивного элемента значение показателя эрозии X_{crit} , которое достигается в процессе внезапного перехода из некоторого промежуточного состояния v . Номера этих состояний определяются зависимостями

$$b = X_{per}/\Delta X \quad \text{и} \quad m = X_{crit}/\Delta X,$$

где ΔX – принятый шаг дискретизации показателя эрозии X .

Течение процесса эрозии, т.е. изменение во времени состояний $\{Q\}$, в общем виде выражается цепью А.А. Маркова, показанной на рис. 2 [12]. Стрелки показывают направление возможных переходов во времени между двумя последовательными значениями показателя эрозии. В общем случае предусматриваются переходы трех типов:

1 - из состояния v в v (сохранение состояния из-за отсутствия или незначительности приращения величины показателя износа X);

2 - из состояния v в $v+1$ (приращение на ΔX величины показателя эрозии конструктивного элемента за прошедший промежуток времени Δt);

3 - из состояния v в m (внезапный отказ эродирующего конструктивного элемента вследствие внезапного достижения величиной показателя X критического значения, приводящего к превышающему).

Переход из состояния v в b специально не выделяется, так как является частным случаем одного из двух первых типов переходов при условии равенства в момент τ_i состояний $b(\tau_i) = v$ или $b(\tau_i) = v + 1$.

Цепи А.А. Маркова (рис. 2) соответствует матрица переходных вероятностей, структура которой инвариантна по отношению к виду эрозионного изнашивания, конфигурации и условиям эрозионно-ударного нагружения конструктивного элемента:

$$[P] = \begin{bmatrix} p_{00} & q_{01} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{0m} \\ 0 & p_{11} & q_{12} & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{1m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_{vv} & q_{v,v+1} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{vm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & p_{bb} & q_{b,b+1} & 0 & 0 & r_{bm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & p_{n-1,n-1} & q_{n-1,n} & r_{n-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & p_{nn} & r_{nm} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

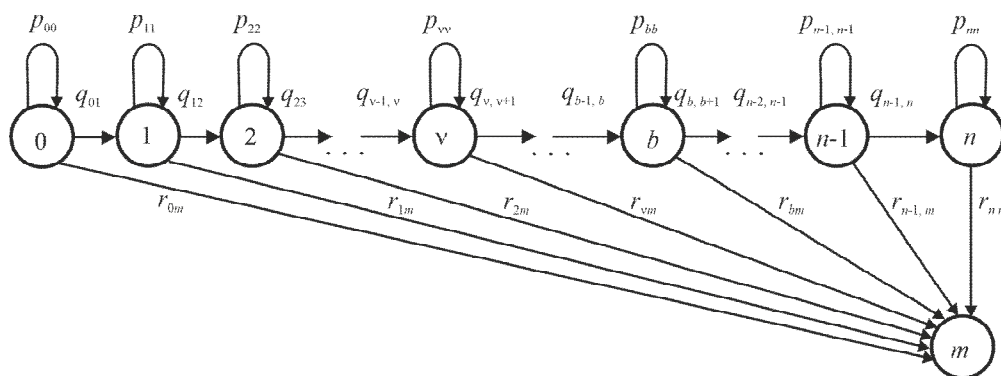


Рис. 2. Цепь А.А. Маркова для изменения состояний показателя эрозионного износа X с течением времени эксплуатации эродирующего конструктивного элемента

где p_{vv} , $q_{v,v+1}$, r_{vm} - вероятности соответствующих переходов, причем

$$p_{vv} + q_{v,v+1} + r_{vm} = 1.$$

Для конструктивных элементов, внезапный отказ которых практически невозможен, переход из состояния v в m не реализуется и в матрице $[P]$ вероятность этого перехода $r_{vm} = 0$, а между вероятностями p_{vv} и $q_{v,v+1}$ будет однозначное соответствие:

$$q_{v,v+1} = 1 - p_{vv}.$$

В результате монотонно гладкая кривая $X_l(\tau)$ моделируется дискретно ступенчатой кривой, скачкообразно возрастающей на равные величины ΔX (т.е. на шаг дискретизации показателя эрозии X) через дискретные промежутки времени, кратные временному шагу $\Delta\tau$. Вследствие кумулятивности кинетических кривых показателей эрозии для соседних моментов времени τ_{i-1} и τ_i справедливо соотношение

$$x_v \geq x_{v-1}.$$

В пределе, при $\Delta\tau \rightarrow 0$ и $\Delta X \rightarrow 0$ ступенчатая кривая стремится к монотонно гладкой.

Таким образом, соотношение (3) применительно к показателю накопленного эрозионного повреждения материала D принимает вид

$$\begin{aligned} & \{D_l(\tau), \tau \geq 0, l = 1, 2, \dots, N_p\} = \\ & = \{D_l(\tau_0) = D_0; D_l(\tau_1) = D_1; \dots; \\ & D_l(\tau_i) = D_v; \dots; D(\tau_s = \tau_u) = D_b = a_p\}, \end{aligned}$$

где $s = \tau_{inc}/\Delta\tau$; $b = a_p/\Delta D$; D_v - накопленное к моменту времени $\tau_i = i\Delta\tau$ ($i = 1, 2, \dots, s$) повреждение микрообъема, принимающее дискретные значения $D_v = v\Delta D$.

Выборочные реализации D_l примут дискретно-ступенчатый вид (рис. 1, б), причем они имеют общее начало $D_l(\tau_0 = 0) = 0$. Шаг $\Delta\tau$ следует выбирать в зависимости от ожидаемой продолжительности τ_{inc} по соотношению

$$\Delta\tau \sim (0,005 \dots 0,02) \tau_{inc}.$$

Шаг приращения повреждения ΔD , чтобы обеспечить рекомендуемую величину вероятностей p_{vv} в матрицах $[P]_i$, должен выбираться по условию (рис. 3):

$$\bar{D}_\tau - S_D \leq \Delta D \leq \bar{D}_\tau,$$

где \bar{D}_τ, S_D - математическое ожидание и стандартное отклонение повреждения, получаемое за промежуток времени $\Delta\tau$ от воздействия эрозионноопасных частиц эродента.

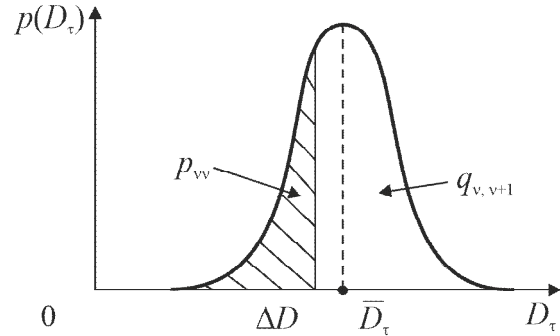


Рис. 3. Оценка переходных вероятностей, исходя из плотности вероятности приращения эрозионного повреждения

Как правило, оборудование, в составе которого эксплуатируются конструктивные элементы, испытывающие каплеударного эрозионное нагружение и изнашивание, работает в условиях переменности режима эксплуатации. В этом случае количественные характеристики случайной величины D_τ также переменны во времени. Как следствие, при сохранении неизменным выбранного шага приращения повреждения ΔD переменными оказываются величины вероятностей перехода. Для j -го интервала разбиения срока эксплуатации оборудования $\Delta\tau_{pj}$, в течение которого элементы массива дискретизации режима $[Z]_j$ приняты неизменными, D_τ определяется, исходя из присущих различным режимам эксплуатации величин эрозионного повреждения и их относительной длительности

$$(D_\tau)_j = \sum_k (D_{\tau,k})_i \cdot (z_k), \quad (5)$$

где индекс k определяет k -й режим эксплуатации из массива $[Z]_j$.

Тогда вероятности перехода в матрицах $[P]_i$ для моментов времени τ_i , принадлежащих j -му интервалу, определяются интегрированием:

$$\begin{aligned} (p_{vv})_i &= \sum_k \int_{-\infty}^{\Delta D} p[(D_\tau)_j] dD, \\ (q_{vv})_i &= 1 - (p_{vv})_i. \end{aligned}$$

В частном случае прогнозирования процесса накопления эрозионного повреждения в материале конструктивного элемента с известным для неё режимом эксплуатации (элементы массива $\{Z\}_j$ являются неслучайными величинами) полученное уравнение упрощается, так как величина D_{τ_j} в этом случае является нормально распределенной:

$$(p_{vv})_i = \sum_k \Phi \left\{ \frac{\Delta D - (\bar{D}_{\tau,k})_j}{(S_{D,k})_j} \right\},$$

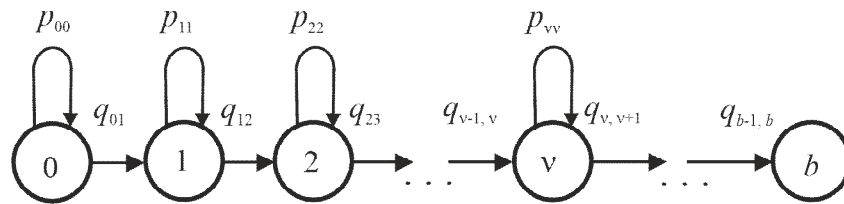


Рис. 4. Цепь А.А. Маркова для изменения состояний показателя эрозионного повреждения материала D_{τ} с течением времени эксплуатации эродирующего конструктивного элемента

Вследствие линейности принятой феноменологической гипотезы суммирования эрозионных повреждений переходные вероятности не зависят от состояния показателя эрозии:

$$(p_{vv})_i = p_i.$$

Матрица переходных вероятностей (4) в результате принимает вид:

$$[P]_i = \begin{bmatrix} p_i & 1-p_i & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_i & 1-p_i & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & p_i & 1-p_i & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & p_i & 1-p_i \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $p_i = 0,5 + \Phi \left(\frac{\Delta D - \bar{D}_{\tau}}{S_D} \right)$.

С помощью матриц $[P]_i$ оцениваются вероятности p_{vi} нахождения показателя D_i в момент времени τ_i в одном из возможных состояний износа $0 \leq v \leq b$:

$$\{p\}_i = \{p\}_{i-1} [P]_i = (\{p\}_{i-2} [P]_{i-1}) [P]_i = \dots = (\dots ((\{p\}_0 [P]_1) [P]_2 \dots) [P]_i), \quad (6)$$

где $\{p\}_i = \{p_{0i} \ p_{1i} \ \dots \ p_{vi} \ \dots \ p_{bi}\}$ - вектор вероятностей нахождения материала в различных состояниях эрозионного повреждения в i -й момент времени; $\{p\}_0 = \{1 \ 0 \ \dots \ 0 \ \dots \ 0 \ 0\}$ - век-

тор, определяющий начальную степень эрозионного повреждения материала во всех b состояниях.

Также упрощается алгоритм итерационного построения кинетической кривой D_i , так как основывается на следующем соотношении:

$$D_i(\tau_i) = \begin{cases} D_v, & \text{если } 0 \leq N \leq p_i, \\ D_{v+1}, & \text{если } 1 - p_i < N \leq 1. \end{cases}$$

Соотношение (6) служит основой для определения продолжительности инкубационного периода эрозии τ_{inc} . В соответствии с ним вероятность достижения предельного

повреждения a_p в момент времени τ_i выражается соотношением

$$R(\tau_{inc} = \tau_i) = \{p\}_i \{p_a\}.$$

Элементы p_{av} вектора $\{p_a\}$ есть вероятности исчерпания инкубационного периода в тот момент, когда повреждение достигло состояния v . Они определяются по известному закону распределения эрозионно-усталостного свойства материала a_p по зависимости

$$p_{av} = \Phi \left[\frac{(v + 0,5) \Delta D - \bar{a}_p}{S_a} \right] - \Phi \left[\frac{(v - 0,5) \Delta D - \bar{a}_p}{S_a} \right]$$

Совокупность значений вероятностей

$$R(\tau_1), R(\tau_2), \dots, R(\tau_i), \dots$$

для ряда моментов времени представляет дискретную функцию вероятности распределения τ_{inc} . На её основе по известным зависимостям теории вероятности определяются количественные характеристики случайной величины τ_{inc} :

- математическое ожидание

$$\bar{\tau}_u = \sum_{i=1}^{i=s} \tau_i [R(\tau_i) - R(\tau_{i-1})]$$

- стандартное отклонение

$$S_{\tau u} = \left\{ \sum_{i=1}^{i=s} \tau_i^2 [R(\tau_i) - R(\tau_{i-1})]^2 - \bar{\tau}_u^2 \right\}^{0,5}.$$

3. Обсуждение результатов

Проверка достоверности предложенного подхода выполнялась путем моделирования процесса накопления повреждений в различных микрообъемах по высоте рабочей лопатки последней ступени части низкого давления а/л «Ленин» с несколькими видами поверхностного упрочнения. В частности, использовались расчетные данные по каплеударной эрозии плазменного эрозионностойкого покрытия из сплава колманой в сечении 0,85 высоты лопатки.

Для упомянутого покрытия из сплава колманой расчет по представленной методи-

ке дает среднее значение инкубационного периода $\bar{\tau}_{inc} = 12740$ ч при стандартном отклонении $S_{\tau, inc} = 1828$ ч. По данным обследования натуральных турбин, представленных в [5], среднее значение инкубационного периода составляет $\bar{\tau}_{inc} = 12825$ ч среднее значение инкубационного периода, а стандартное отклонение - $S_{\tau, inc} = 1807$ ч. Подобное удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных для средних значений и стандартных отклонений продолжительностей инкубационных периодов характерно и для других сечений по высоте рабочих лопаток и остальных представленных в [5] видов упрочнения.

4. Выводы

Представленная методика прогнозирования длительности инкубационного периода материала поверхности конструктивных элементов оборудования, находящегося в условиях каплеударного нагружения и изнашивания, позволяет достаточно адекватно оценивать указанный ключевой параметр процесса.

Знание продолжительности инкубационного периода позволяет определить и ряд других важных количественных характеристик эрозионного изнашивания натуральных элементов оборудования. В частности, для деталей, поверхность (или известная часть поверхности) которых находится в условиях одинаковой интенсивности каплеударного нагружения, знание величины τ_{inc} позволяет с помощью зависимости (1) определить потери изношенного материала по глубине детали и по весу (массе) в течение периода максимальной скорости износа. Для деталей, поверхность которых находится в условиях неоднородной интенсивности каплеударного нагружения, знание величины τ_{inc} позволяет дополнительно определить изменение геометрических характеристик зоны эрозии – ее длину, ширину и площадь.

Список литературы

1. Рыженков В.А., Лебедева А.И., Медников А.Ф. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 9-13.
2. Tomarov G.V., Shipkov A.A., Komisarova T.N. Factors and Mechanisms Causing Wear of Turbine Heating Steam Condensate Pipeline Components at a Nuclear Power Plant // *Thermal Engineering*. 2019. Vol. 66. P. 662–671. DOI: 10.1134/S0040601519090052
3. Khan M.S., Sasikumar C. A water droplet erosion-induced fatigue crack propagation and failure in X20Cr13 martensitic stainless-steel turbines working at low pressure // *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 139. P. 106491. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106491.
4. Фомин В.В., Казарновская И.И. Сопротивляемость высокопрочных нержавеющей сталей ударно-циклическому воздействию водяной струи // Теплоэнергетика. 1966. № 2.- С. 83–86.
5. Лагереv А.В. Эрозия паровых турбин: вероятностный подход: в 3 т. Т. 1. Вероятностный анализ паровых турбин. Москва: Машиностроение-1, 2006. 267 с.
6. Лагереv А.В. Вероятностная оценка падения мощности эродирующей влажнопаровой турбинной ступени в процессе эксплуатации // Известия вузов. Энергетика. 1991. №9. С.108-114.
7. Slot H., Matthews D., Schipper D., van der Heide E. Fatigue-based model for the droplet impingement erosion incubation period of metallic surfaces // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2021. Vol. 44. No. 1. P. 199-211. DOI: 10.1111/ffe.1335
8. Фаддеев И.П. Эрозия влажнопаровых турбин. Ленинград.: Машиностроение, 1974. 208 с.
9. Эрозия / Под ред. К.Прис. Москва: Мир, 1982. 464 с.
10. Поддубенко В.В., Яблоник Р.М. Влияние структуры потока капель на эрозию турбинных лопаток // Изв. вузов. Энергетика. 1976. № 4. С. 88–94.
11. Krzyzanowski Y. Comments on accu-

References

1. Ryzhenkov V.A., Lebedeva A.I., Mednikov A.F. *Sovremennoe sostoyanie i sposoby resheniya problemy erozionnogo iznosa lopatok vlazhno-parovykh stupeney turbin*. *Teploenergetika*, 2011, No. 9, pp. 9-13. (In Russian)
2. Tomarov G.V., Shipkov A.A., Komisarova T.N. Factors and Mechanisms Causing Wear of Turbine Heating Steam Condensate Pipeline Components at a Nuclear Power Plant. *Thermal Engineering*, 2019, Vol. 66, pp. 662–671. DOI: 10.1134/S0040601519090052
3. Khan M.S., Sasikumar C. A water droplet erosion-induced fatigue crack propagation and failure in X20Cr13 martensitic stainless-steel turbines working at low pressure. *Engineering Failure Analysis*, 2022, Vol. 139, pp. 106491/ DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106491
4. Fomin V.V., Kazarnovskaya I.I. Soпротивlyaemost vysokoprochnykh nerzhavayushchikh staley udarno-tsiklicheskomu vozdeystviyu vodyanoy strui. *Tploehnergetika*, 1966, No. 2, pp. 83–86. (In Russian)
5. Lagerev A.V. *Eroziya parovykh turbin: veroyatnostnyy podkhod: v 3 t. Tom. 1. Veroyatnostnyy analiz erozii parovykh turbin* [Erosion of steam turbines: a probabilistic approach: in 3 vol. Vol. 1. Probabilistic analysis of steam turbine erosion]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2006. 267 p. DOI: 10.5281/zenodo.1311894 (In Russian)
6. Lagerev A.V. Probabilistic estimation of power reduction of an eroding wet-steam turbine stage during operation. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1991, No. 9, pp. 108-114 (In Russian)
7. Slot H., Matthews D., Schipper D., van der Heide E. Fatigue-based model for the droplet impingement erosion incubation period of metallic surfaces. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, Vol. 44, No. 1, pp. 199-211. DOI: 10.1111/ffe.1335
8. Faddeev I.P. *Eroziya vlazhnoparovykh turbin* [Erosion of wet steam turbines]. Leningrad, Mashinostroenie, 1974. 208 p. (In Russian)
9. Treatise on materials science and technology. Volume 16. Erosion. Bell Telephone Laboratories, Inc., 1979.
10. Poddubenko V.V., Yablonik R.M. Vliyanie struktury potoka kapel na eroziyu turbin-

racy in predicting steam turbine blading erosion // Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 5-6 Sept. 1983. P. 26/1–26/12.

12. Лагереv А.В. Вероятностная теория механической эрозии. Москва: Машиностроение-1, 2004. 343 с.

13. Лагереv А.В. Кавитационное изнашивание элементов дисков и рабочих лопаток мощных паровых турбин // Тяжелое машиностроение. 2007. № 6. С. 23-27.

† nykh lopatok. *Izvestiya vuzov. Energetika*, 1976, No. 4, pp. 88–94. (In Russian)

† 11. Krzyzanowski Y. Comments on accuracy in predicting steam turbine blading erosion. In: Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 5-6 Sept. 1983. P. 26/1–26/12.

† 12. Lagerev A.V. *Veroyatnostnaya teoriya mekhanicheskoy erozii* [Probabilistic theory of mechanical erosion]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2004. 343 p.

† DOI: 10.5281/zenodo.1311851 (In Russian)

† 13. Lagerev A.V. Cavitation wear of the steam turbines working blades. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2007, No. 6, pp. 23-27. (In Russian)