

УДК (UDC) 620.193.1:621.165

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТРЕХФАЗНОМ
ЭРОЗИОННОМ ИЗНАШИВАНИИMECHANICAL AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THREE-PHASE EROSIIVE
WEARЛагереv А.В.
Lagerev A.V.Российский университет транспорта (Москва, Россия)
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. В процессе эксплуатации различного ответственного технологического оборудования, в частности, энергетического (паровых и влажнопаровых турбин, трубопроводов влажного пара и др.) наблюдается эрозионно-ударное нагружение конструктивных элементов технологического оборудования со стороны содержащихся в газовых или воздушных потоках рабочего тела полидисперсных капель влаги и твердых частиц загрязнений и примесей. Это обуславливает трехфазный характер процесса эрозионного изнашивания поверхности конструктивных элементов оборудования. Большинство загрязнений и примесей являются гидрофильными, вследствие чего относительно крупные твердые частицы обволакиваются влагой с образованием жидкой пленки на их поверхности, а более мелкие взвешены в объеме капель. Это делает невозможным простой перенос на условия трехфазного эрозионного изнашивания результатов исследований и методов прогнозирования либо только каплеударного, либо только газообразного эрозионного изнашивания. В статье представлены математические модели механических и гидродинамических мипроцессов, протекающих во время соударения композитной капли влаги, т.е. капли с находящейся внутри твердой частицей, с поверхностью конструктивного элемента. Явление соударения рассмотрено в виде двух последовательных стадий. Первая, начальная стадия включает взаимодействие поверхности конструктивного элемента с жидкой фазой композитной капли. На основе одномерной лучевой теории рассмотрено образование и распространение системы отраженных и преломленных волн давления и напряжения в элементе, жидкости и частице, получены количественные зависимости для оценки характерных параметров процессов – длительности, давлений, скорости движения. Вторая, заключительная стадия включает взаимодействие поверхности конструктивного элемента с твердой частицей эродента. Построены система уравнения движения частицы в процессе ее внедрения и отскока с учетом действия жидкости за тыльной стороной твердой частицы. Также предложена зависимость для количественной расчетной оценки величины эрозионно-усталостного повреждения поверхности конструктивного элемента от удара единичной композитной капли.

Abstract. During the operation of various critical technological equipment, in particular, energy (steam and wet steam turbines, wet steam pipelines, etc.), erosion loading of the structural elements of technological equipment is observed from the side of polydisperse droplets of moisture and solid particles of pollutants and impurities contained in the gas or air streams of the working fluid. This determines the three-phase nature of the process of erosive wear of the surface of the structural elements of the equipment. Most pollutants and impurities are hydrophilic, as a result of which relatively large solid particles are enveloped in moisture to form a liquid film on their surface, while smaller ones are suspended in the volume of droplets. This makes it impossible to easily transfer to the conditions of three-phase erosive wear the results of research and methods of forecasting either only drop-impact or only gas-abrasive erosive wear. The article presents mathematical models of mechanical and hydrodynamic processes occurring during the impact of a composite drop of moisture, i.e. droplets with a solid particle inside, with the surface of a structural element. The impact phenomenon is considered in the form of two consecutive stages. The first, initial stage involves the interaction of the surface of the structural element with the liquid phase of the composite droplet. Based on the one-dimensional ray theory, the formation and propagation of a system of reflected and refracted pressure and stress waves in an element, liquid, and particle are considered, and quantitative dependences are obtained to evaluate the characteristic parameters of processes - duration, pressures, and velocity. The second and final stage involves the interaction of the surface of the structural element with a solid eroding particle. A system of equations of motion of a particle in the process of its insertion and rebound is constructed, taking into account the action of a liquid behind the back of a solid particle. A dependence is also proposed for the quantitative calculation of the value of the erosion and fatigue damage to the microplate of the surface of the structural element from the impact of a single composite drop.

Ключевые слова: эрозия, жидкие капли, твердые примеси, объемная волна давления, поле давлений.

Дата получения статьи: 05.03.2026
Дата принятия к публикации: 05.06.2026
Дата публикации: 25.06.2026

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>

Keywords: erosion, liquid droplets, solid impurities, volumetric pressure wave, pressure field.

Date of manuscript reception: 05.03.2026
Date of acceptance for publication: 05.06.2026
Date of publication: 25.06.2026

Author' 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

Отличительной чертой эрозионно-ударного нагружения конструктивных элементов технологического оборудования, которые взаимодействуют с газовыми или воздушными потоками рабочего тела, содержащими относительно небольшое количество влаги в виде полидисперсных капель и твердых частиц загрязнений и примесей, является трехфазный характер процесса эрозионного изнашивания.

Подобные условия характерны для энергетического оборудования, в частности, для проточных частей влажнопаровых турбинных ступеней конденсационных и теплофикационных турбин ТЭС, влажнопаровых турбин ГеоТЭС, трубопроводов влажного пара [1, 2]. В этом случае в потоке рабочего тела имеет место тесный контакт твердых частиц (продуктов коррозии и эрозии, частиц отложений, нерастворимых примесей, прошедших систему сепарации и др.) с жидкой фазой вследствие столкновения с каплями влаги и конденсации переохлажденного влажного пара. Преобладающее большинство примесей по классификации [3] являются гидрофильными, хорошо смачиваемыми водой. В условиях движения в проточной части влажнопаровых турбинных ступеней следует ожидать, что относительно крупные твердые частицы обволакиваются влагой с образованием жидкой пленки на их поверхности, а более мелкие взвешены в объеме капель. Указанная особенность делает невозможным простой перенос на условия турбинных ступеней результатов исследований

и методов прогнозирования газо-абразивного эрозионного изнашивания, достаточно широко развитых применительно к износу проточных частей газовых турбин, компрессоров и ступеней перегретого пара паровых турбин [4 - 6]. Возможное взаимовлияние жидкой и твердой фаз на эрозионное изнашивание должно учитываться при создании феноменологической вероятностной модели механизма эрозионного изнашивания и оценки параметра ударного микронагружения поверхности конструктивного элемента с учетом влияния на него объема связанной с твердой частицей жидкости.

2. Начальная стадия соударения композитной капли

Обобщенная модель эрозионно-усталостного повреждения материалов в условиях трехфазной эрозии поверхности элементов конструкций при ударном воздействии газового или парового потока рабочего тела, содержащего твердые частицы примесей в объеме капель влаги или иной жидкости, может быть построена на основе рассмотрения гидродинамических и механических явлений при соударении с поверхностью упругого полупространства твердой частицы эродента размером d_p , находящейся в объеме жидкой частицы размера $d_d > d_p$.

В первом приближении будем рассматривать сферическую каплю радиусом r_d , содержащую одну сферическую твердую частицу диаметром d_p . Центр тяжести частицы располагается на оси симметрии капли, параллельной вектору её скорости. Таким об-

разом, в данной статье рассматривается одномерная модель процесса соударения композитной капли с твердой поверхностью, т.е. задача оценки максимальных величин ударного давления и амплитуды переменных эрозионно-ударных напряжений вследствие одиночного акта нагружения σ_e решается в одномерной постановке.

В начальный момент соударения в объеме капли возникает присоединенная к пятну контакта первичная волна сжатия. Её фронт распространяется по направлению к поверхности частицы. В интервале времени до достижения волной сжатия поверхности частицы гидродинамические процессы в объеме жидкости полностью аналогичны удару капли без частицы [7]. От твердой поверхности частицы первичная волна отражается и образуется вторичная волна сжатия, которая распространяется назад к поверхности соударения. Она достигает её через промежуток времени

$$\Delta\tau_1 = \frac{2x_0}{C' + v'_n}, \quad (1)$$

где $x_0 = r_d - d_p / 2$ - толщина слоя жидкости перед фронтом твердой частицы; C' - скорость волны давления в жидкости; v'_n - нормальная составляющая скорости соударения капли.

Затем эта вторичная волна сжатия испытывает новое отражение и в виде волны сжатия опять движется по направлению к частице. Далее процесс повторяется. По мере продвижения частицы к поверхности конструктивного элемента интервал времени между $(k-1)$ -м и k -м подходами отраженных волн к пятну контакта уменьшается, причем с увеличением скорости удара это проявляется более интенсивно. Промежуток времени сокращается согласно следующей зависимости:

$$\Delta\tau_k = \Delta\tau_{k-1} \frac{C' - v'_n}{C' + v'_n} = \Delta\tau_1 \left(\frac{C' - v'_n}{C' + v'_n} \right)^{k-1}. \quad (2)$$

Первичная волна сжатия на поверхности частицы наряду с отражением также испытывает преломление с образованием вторичной преломленной волны напряжения сжатия. Волна распространяется вглубь частицы, испытывает отражение от тыльной по-

верхности частицы и в виде волны напряжения растяжения возвращается к передней поверхности, испытывает отражение с преобразованием в волну сжатия и т.д. Преломленная на тыльной поверхности частицы волна сжатия движется к поверхности капли, испытывает отражение и в виде волны растяжения возвращается назад. Таким образом, в объеме композитной капли формируется в результате многочисленных актов отражения-преломления на границах трех фаз сложная система первичных и вторичных волн сжатия и растяжения, имеющих различные скорости движения в жидкой и твердой фазах.

Лучевая схема перемещения во времени фронтов волн сжатия и растяжения в капле и в частице приведена на рис. 1.

Наличие в объеме капли нескольких поверхностей раздела разнородных материалов приводит к появлению значительного числа вторичных отраженных и преломленных волн сжатия и растяжения, движение и суперпозиция которых определяет изменение во времени поля давлений в жидкости, поля напряжений в частице и поверхностного давления в пределах пятна контакта. На рис. 2 представлены результаты количественного анализа указанных величин при ударе со скоростью 300 м/с капли диаметром 400 мкм, содержащей расположенную в центре частицу окаины диаметром 100 и 300 мкм. При расчете был использован алгоритм, основанный на представлении лучевых схем движения волн напряжений в слоистом материале ориентированными графами [8]. На этом же рисунке также представлены результаты расчета поля давлений в жидкости и поверхностного давления при ударе капли без частицы.

В промежутке времени $0 \dots \Delta\tau_1$ начальная фаза процесса соударения капли с частицей аналогична начальной фазе соударения капли без частицы. Однако затем появляются принципиальные различия. В момент $\Delta\tau_1$ на эпюре изменения во времени поверхностного давления наблюдается вторичный пик $P_{imp,2}$ значительной величины. Его значение зависит от расстояния x_0 - расстояния между

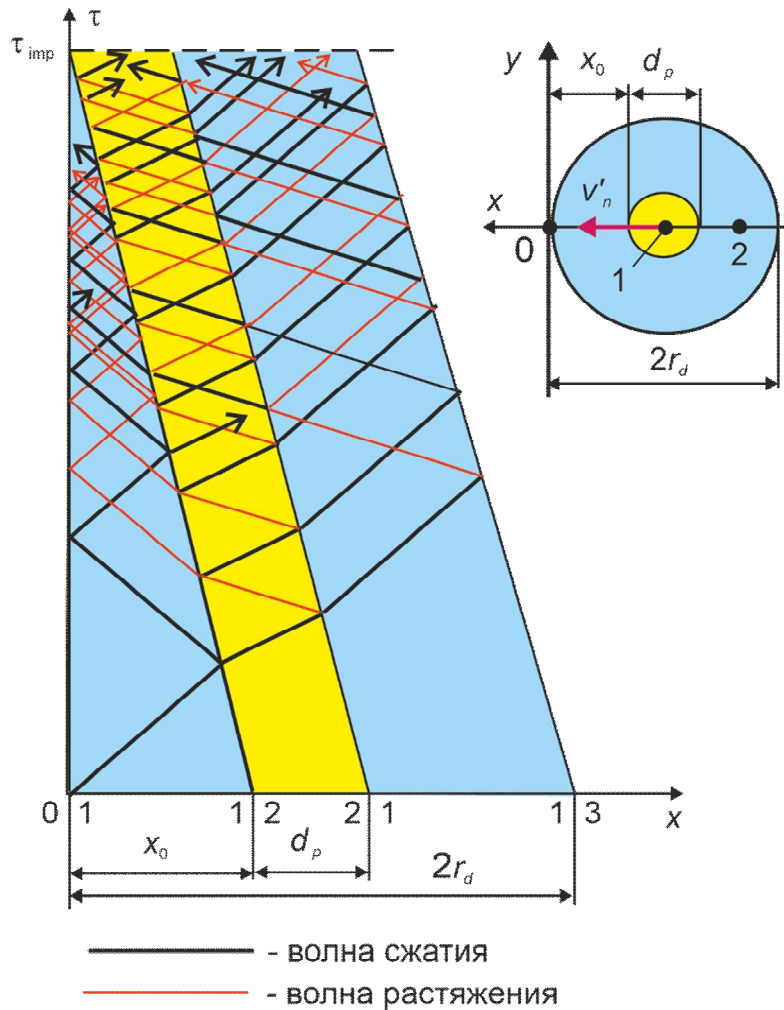


Рис. 1. Лучевая схема движения фронтов волн вдоль оси $y = 0$ в капле и частице

частицей и поверхностью полупространства в начальный момент соударения и может быть оценено по зависимости

$$P_{imp,2} = P_{imp} \left\{ \exp \left[- \frac{6x_0}{r_d \left(\frac{v'_n}{C'} + 1 \right)} \right] + \xi_{12}^{rl} (1 + \xi_{10}^{rl}) \right\}, \quad (3)$$

где P_{imp} - гидродинамическое давление при ударе капли [5, 9]; ξ_{01}^{rl} - коэффициент отражения на границе раздела «поверхность-капля»; ξ_{12}^{rl} - коэффициент отражения на границе раздела «капля-частица».

Как следует из выражения (3), существует интервал $x_0 \in (0; x_{0,cr})$, для которого наблюдается превышение величиной вторичного пика давления $P_{imp,2}$, подсчитанного по параметрам соударения капли без частицы.

Пороговое значение $x_{0,cr}$ можно найти из выражения (3) при условии $P_{imp,2} = P_{imp}$:

$$x_{0,cr} = - \frac{r_d}{6} \left(\frac{v'_n}{C'} + 1 \right) \ln \left[1 - \xi_{12}^{rl} (1 + \xi_{10}^{rl}) \right]. \quad (4)$$

Относительная доля от общего числа соударений одинаковых капель влаги с превышением давлением $P_{imp,2}$ давления P_{imp} в предположении о равной вероятности нахождения частицы в произвольной точке объема капли с плотностью вероятности

$$p(x_0) = (2r_d - d_p)^{-1} \quad (5)$$

оценивается величиной

$$\bar{n} = \frac{\left(\frac{v'_n}{C'} + 1 \right) \ln \left[1 - \xi_{12}^{rl} (1 + \xi_{10}^{rl}) \right]}{6 \left(\frac{d_p}{r_d} - 2 \right)} \quad (6)$$

и составляет примерно 30 ... 50 %.

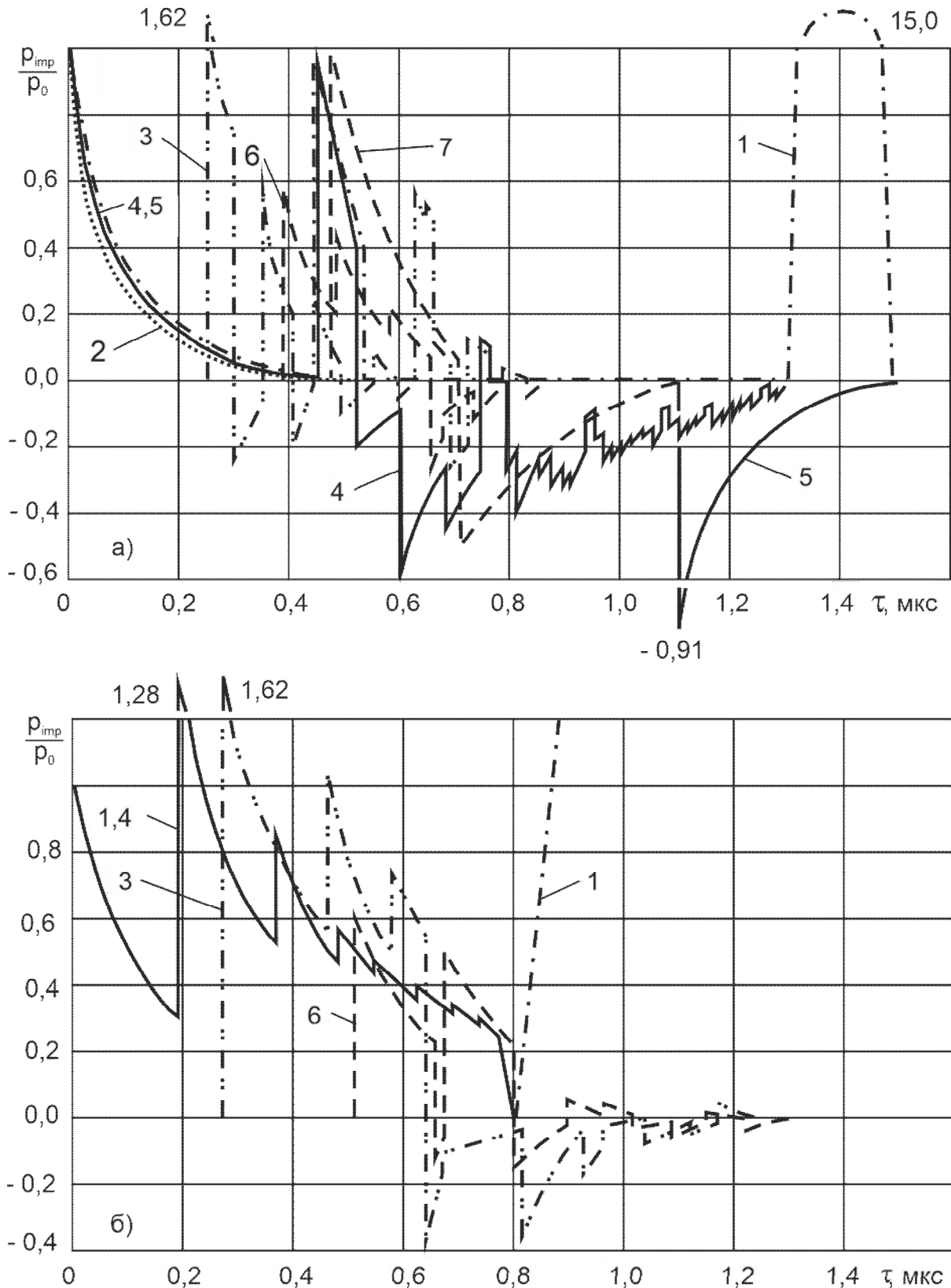


Рис. 2. Начальная стадия соударения капли диаметром 400 мкм со скоростью 300 м/с, содержащей частицу окалина : а – диаметром 100 мкм; б – диаметром 300 мкм (1, 2, 4, 5 – давление в центре пятна контакта; 3 – напряжение в точке 1 частицы; 6, 7 - давление в точке 2 жидкости; 1, 3, 4, 6 – капля с частицей; 2, 5, 7 – капля без частицы)

В зависимости от величины x_0 могут наблюдаться дополнительные пики поверхностного давления, связанные с подходом к поверхности соударения вторичных отраженных от частицы волн сжатия. В частности, на рис. 2 при $\tau \approx 0,75$ мкс наблюдается ещё один такой пик величиной $p_{imp,2} / p_{imp} = 0,14$. С уменьшением x_0 число пиков, а также их высота будут возрастать, так как сокращаются промежутки времени между последующими подходами отраженных волн и соответственно увеличивается число накладывающихся друг на друга волн сжатия. Такая эпюра изменения во времени поверхностного давления характерна для частиц, поверхность которых покрыта пленкой жидкости малой толщины. Она иллюстрируется рис. 2, б для соотношения размеров $d_p / 2r_d$. Верхнюю оценку максимально возможного повышения поверхностного давления по сравнению с величиной p_{imp} можно сделать при рассмотрении предельного перехода $x_0 \rightarrow 0$

$$\frac{(p_{imp,2})_m}{p_{imp}} = 1 + \frac{1 + \frac{\xi_{10}^{rl}}{\xi_{12}^{rl}}}{1 - \frac{\xi_{12}^{rl}}{\xi_{10}^{rl}}}. \quad (7)$$

Величина $(p_{imp,2})_m$ зависит от механических свойств взаимодействующих материалов и, как правило, лежит в интервале (4 ... 7) p_{imp} .

Давление в объеме жидкости, заключенном между поверхностью соударения и частицей, подвержено высокочастотным колебаниям. Это связано с воздействием волн растяжения, образованных при преломлении в жидкости движущихся внутри частицы волн напряжения растяжения. Вблизи поверхности соударения возникает зона положительных напряжений. Величина их намного превышает предел прочности воды на растяжение, и внутри зоны возможно нарушение сплошности объема жидкости. Время образования зоны заметно (по данным рис. 29,а примерно в 2 раза) сокращается по сравнению с ударом капли без частицы. Это обстоятельство, а также периодическое по-

вышение давления в моменты прохода отраженных от частицы волн сжатия позволяет предполагать интенсификацию кавитационных процессов в капле из-за наличия в ней частицы. Однако при малой толщине слоя жидкости на передней поверхности частицы $d_p / 2r_d \rightarrow 1$ (т.е. при малом x_0) зона положительных напряжений не возникает, так как сформировавшаяся в частице волна растяжения не успевает вернуться в объем жидкости до момента соприкосновения частицы с поверхностью полупространства. В этом случае отсутствуют условия для возникновения кавитационных процессов. Оценка минимального значения $d_p / 2r_d$, при котором отсутствует зона растяжения, может быть выполнена по зависимости

$$\left(\frac{d_p}{2r_d} \right)_{\min} = \left[4 \left(\frac{v'_n}{C'} + 1 \right) \frac{v'_n}{C_{1p}} + 1 \right]^{-1}, \quad (8)$$

где C_{1p} - скорость продольной волны в частице.

Практически $(d_p / 2r_d)_{\min} \sim 0,65 \dots 0,95$, причем оно возрастает с уменьшением скорости соударения v'_n и увеличением скорости продольной волны в частице C_{1p} .

Поле давлений в капле за частицей также переменено во времени. В нем могут возникать зоны положительных напряжений, превышающих предел прочности воды на растяжение. Это не скажется на повреждении поверхности соударения, однако несомненно влияет на процесс разбрызгивания капли.

В частице возникает знакопеременное во времени напряженное состояние с коэффициентом асимметрии $r < -1$. Максимальные по абсолютной величине напряжения (отрицательные) наблюдаются при первом прохождении преломленной на поверхности частицы волны напряжения сжатия. Напряжение сжатия в ξ_{12}^{rr} раз превышает давление p_{imp} (где ξ_{12}^{rr} - коэффициент отражения на границе раздела «капля-частица»). Напряжение растяжения заметно ниже, однако также значительно по величине. Как напряжения сжатия, так и растяжения могут оказаться достаточными для разрушения частицы на

несколько более мелких осколков. В первую очередь это относится к продуктам коррозии и частицам отложений, обладающих низкими пластическими свойствами при возможном наличии в них микротрещин.

3. Заключительная стадия соударения твердой частицы эродента

Заключительная фаза соударения - взаимодействие частицы с поверхностью упругого полупространства. В этом случае пригодна та же квазистатическая модель неглубокого внедрения твердых частиц эродента в поверхность эродирующего элемента конструкции в условиях герцевского типа контакта, которая рассматривалась ранее в [8]. Модель можно считать справедливой, так как время прохождения волной напряжения в

поверхностном слое элемента расстояния, равного наибольшему радиусу пятна контакта, почти на порядок меньше продолжительности соударения τ_{imp} .

Обобщим эту модель применительно к трехмерному анализу ударного взаимодействия твердой абразивной частицы с поверхностью вращающегося конструктивного элемента в условиях дополнительного воздействия жидкости. Перемещение частицы вдоль эродирующей поверхности рассмотрим относительно следующих систем координат (рис. 3,а):

- связанной с осью вращения конструкции прямоугольной системы xzr ;
- связанной с поверхностью конструктивного элемента P прямоугольной системы $\tau_1 \tau_2 n$.

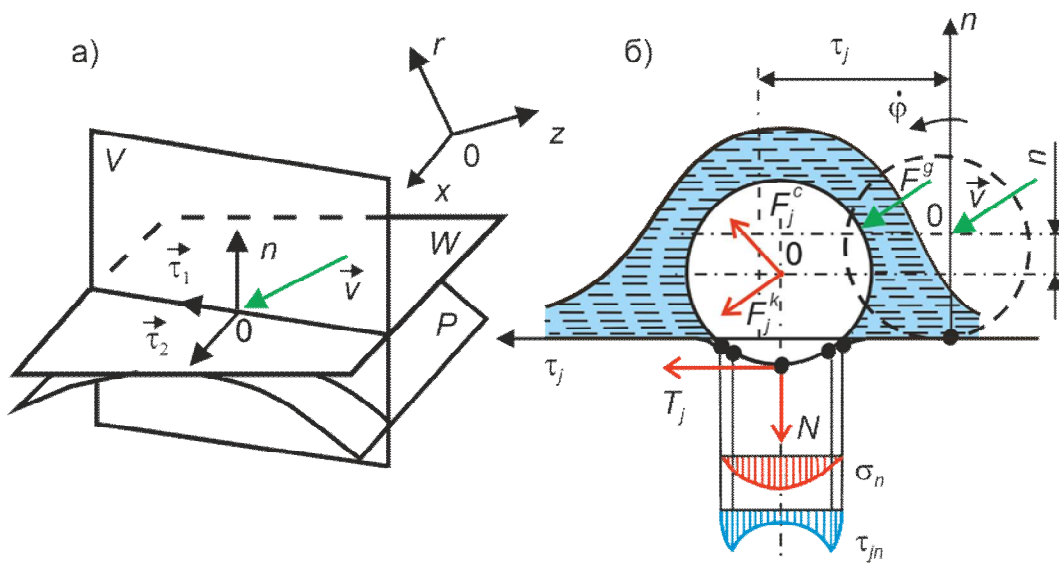


Рис. 3. Схема взаимодействия твердой частицы с поверхностью конструктивного элемента: а – система координат; б – система действующих сил

Ось τ_1 совпадает с линией пересечения плоскостей W (касательная к поверхности P в точке соударения) и V (нормальная к W и содержащая вектор скорости соударения \vec{v}), ось n - нормаль к поверхности P , ось τ_2 - дополняет тройку ортов до правой системы координат. Как правило, главные радиусы кривизны поверхности натуральных конструкций на несколько порядков превышают длину перемещения частицы вдоль эродирующей

поверхности, поэтому в дальнейших построениях кривизна поверхности P не учитывается.

На твердую частицу эродента в процессе соударения действует система сил, показанных на рис. 3, б:

- радиальная контактная сила Герца

$$N = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi(k+k_p)} d_p^{0.5} n^{1.5}, \quad (9)$$

направленная по нормали к поверхности полупространства и вызывающая на расстоянии y от центра пятна контакта давление

$$\sigma_n = \frac{4}{\pi^2(k+k_p)d_p} \left(\frac{d_p n}{2} - y^2 \right)^{0.5}; \quad (10)$$

$$T_j = \left\langle 1 - \left[1 - \frac{2\pi(k+k_p) \left[(\tau_1^2 + \tau_2^2)^{0.5} - \frac{d_p \varphi}{2} \right]}{(2-\nu_p)(g+g_p)Gfn} \right]^{1.5} \right\rangle \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} f d_p^{0.5} n^{1.5} \cos(\bar{\tau}_j, \bar{v}_{12}), \quad (11)$$

направленная вдоль линии пересечения касательных плоскостей к поверхности конструкции W и к траектории движения частицы и вызывающая на расстоянии y от центра пятна контакта касательные напряжения

$$\tau_{jn} = \frac{T_j}{\pi \sqrt{2d_p n(d_p n - y^2)}}; \quad (12)$$

- центробежная сила от вращения частицы вместе с конструкцией в системе xzr , направленная по радиусу вращения r :

$$F^c = \frac{4\pi}{3} \rho_p d_p^3 \omega^2 r; \quad (13)$$

- сила Кориолиса

$$F^K = 2\omega(\dot{\tau}_1^2 + \dot{\tau}_2^2 + \dot{n}^2)^{0.5} \sin(\bar{\omega}, \bar{v}); \quad (14)$$

- гидродинамическая сила скоростного напора объема жидкости за тыльной поверхностью частицы

$$F^g = \frac{\pi}{8} C_x \rho' d_p^2 (v - \dot{n})^2, \quad (15)$$

направленная вдоль вектора скорости капли в точке соударения и действующая с момента начального касания поверхности конструкции в течение промежутка времени

$$m_p \ddot{\tau}_1 = -T_1 - F^c \cos(\bar{\tau}_1, \bar{r}) - F^K \cos(\bar{\tau}_1, \bar{F}^K) - F^g \cos(\bar{\tau}_1, \bar{v}), \quad (17)$$

$$m_p \ddot{\tau}_2 = -T_2 - F^c \cos(\bar{\tau}_2, \bar{r}) - F^K \cos(\bar{\tau}_2, \bar{F}^K), \quad (18)$$

$$m_p \ddot{n} = -N - F^c \cos(\bar{n}, \bar{r}) - F^K \cos(\bar{n}, \bar{F}^K) - F^g \sin(\bar{\tau}_1, \bar{v}), \quad (19)$$

$$J_p \ddot{\varphi} = 0.5(T_1^2 + T_2^2)^{0.5} \left[d_p + \frac{Nv_p}{G_p(2d_p n)^{0.5}} \right] \quad (20)$$

при начальных условиях

$$\tau_1(\tau=0) = \tau_2(\tau=0) = n(\tau=0) = \varphi(\tau=0) = \dot{\tau}_2(\tau=0) = 0; \quad (21)$$

$$\dot{\tau}_1(\tau=0) = v_{p0} \cos(\bar{v}', \bar{\tau}_1); \quad \dot{n}(\tau=0) = v_{p0} \sin(\bar{v}', \bar{\tau}_1); \quad \dot{\varphi}(\tau=0) = \dot{\varphi}_0, \quad (22)$$

- тангенциальная контактная сила с проекциями на оси τ_1 и τ_2 поверхностной системы координат $\tau_1 \tau_2 n$ ($j=1, 2$)

$$\Delta\tau \approx \frac{2r_\kappa - x_0 - d_p}{v'}, \quad (16)$$

где $g = 2v/G$, $g_p = 2v_p/G_p$, $k = (1-\nu)/2\pi G$, $k_p = (1-\nu_p)/2\pi G_p$ - коэффициенты упругих свойств материалов конструктивного элемента и частицы; ν , ν_p - коэффициент Пуассона материалов конструктивного элемента и частицы; G , G_p - модуль сдвига материалов конструктивного элемента и частицы; ρ_p , ρ' - плотность материала частицы и капли; ω - угловая скорость вращения конструктивного элемента; \bar{v}_{12} - векторный элемент проекции траектории частицы на плоскость W ; f - коэффициент трения между частицей и материалом поверхности; v - линейная скорость частицы; C_x - коэффициент аэродинамического сопротивления для тыльной стороны частицы.

Проецируя векторы перечисленных сил, получим систему четырех дифференциальных уравнений движения частицы:

где m_p, J_p - масса и момент инерции частицы.

При анализе процесса взаимодействия частицы с не вращающимся конструктивным элементом система (17) – (20) упрощается вследствие равенства 0 инерционных сил F^c и F^K . Следует также отметить, что для условий газообразивной эрозии (когда жидкая фаза отсутствует) эта система также упрощается вследствие равенства 0 гидродинамической силы F^g .

В общем случае входящая в начальные условия скорость частицы v_{p0} в момент её

$$\frac{dv_p}{dx} = \begin{cases} \frac{2\rho' [C_{x1} (v' - v_p)^2 - C_{x2} v_p^2]}{3 \left(\rho_p + \frac{\rho'}{2} \right) d_p v_p}, \\ - \frac{2C_{x2} \rho' v_p}{3 \left(\rho_p + \frac{\rho'}{2} \right) d_p} \text{ при } \int_0^\tau (v' - v_p) dt > \Delta x = 2r_d - x_0 - d_p \end{cases} \quad (23)$$

с начальными условиями $x = 0$ и $v_p(0) = v'$,

где C_{x1}, C_{x2} - коэффициенты аэродинамического сопротивления для передней и тыльной сторон частицы.

Решение уравнения (23) в конечной точке траектории движения частицы в объеме жидкости на протяжении длины пути δ_f является искомой величиной v_{p0} . Относительное снижение скорости частицы в жидкости v_{p0}/v определяется плотностью частицы и длиной пути δ_f (рис. 4).

Действующие на твердую частицу силы неодинаковы по величине и характеру изменения во времени. Доминирующее воздействие оказывают контактные силы - сумма наибольших значений инерционных и гидродинамической сил составляет несколько процентов от наибольшего значения контактных сил. Однако в начальной стадии соударения, когда контактные силы вследствие малой глубины внедрения частицы ещё малы, инерционные силы максимальны и могут играть заметную роль. Продолжительность этой стадии невелика по отношению ко времени удара, так как контактные силы быстро возрастают до максимального значения в

соприкосновения с поверхностью может отличаться от скорости подлета из-за тормозящего воздействия со стороны жидкости, присутствующей на поверхности конструктивного элемента. Рассматривая движение частицы под действием противоположно направленных гидродинамических сил скоростного напора объемов жидкости на передней и тыльной поверхностях с учетом присоединенной массы жидкости, на основе принципа Даламбера получаем дифференциальное уравнение:

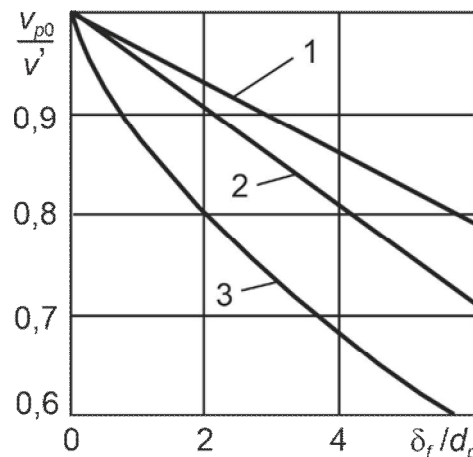


Рис. 4. Снижение скорости соприкосновения частицы с поверхностью конструктивного элемента при наличии жидкости (материал частицы: 1 – сталь; 2 – окалина; 3 – корунд)

момент наибольшего внедрения частицы в поверхностный слой конструктивного элемента. Влияние наличия жидкости приводит к увеличению глубины внедрения частицы, времени её взаимодействия с поверхностью, величины давления на пятне контакта и повреждения материала микрообъемов конструкции.

Присутствие жидкости может заметно сказываться на поведении частицы при отскоке. При относительном размере

$d_p/2r_d \rightarrow 1$ жидкость воздействует на тыльную поверхность частицы в течение начального промежутка времени, меньшего продолжительности взаимодействия частицы с упругим полупространством τ_{imp} . Затем сила от скоростного напора жидкости исчезает. Тормозящая отскок частицы сила отсутствует, и скорость частицы v_{rL} при режимах соударения, близких к абсолютно упругому, может превысить начальную скорость v_{p0} , а при отсутствии жидкости на поверхности конструктивного элемента - и скорость v' . При режимах соударения, значительно отличающихся от названного ($v_{rL} < v_{p0}$), однако, выше, чем скорость отскока сухой частицы v_{rD} . Для сравнительно крупных частиц с толщинами жидкости на их тыльной поверхности $\Delta x \geq v' \tau_{imp}$ воздействие жидкости наблюдается в течение всего времени τ_{imp} и уменьшение скорости отскока можно приближенно оценить с помощью закона сохранения энергии:

$$\frac{v_{rL}}{v_{rD}} = \left\{ 1 - \frac{3[\rho'(v_{p0} + v_{rD})^2(\Delta x - v' \tau_{imp}) + \pi\sigma]}{\rho_p d_p v_{rD}^2} \right\}^{0,5}, \quad (24)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

На рис. 5 представлены результаты численного расчета по зависимостям (17) – (20) параметров соударения частицы с поверхностью конструктивного элемента, не покрытой слоем жидкости ($\delta_f = 0$). Как следует из расчета, для относительно малых частиц наличие окружающей их жидкости принципиально сказывается на поведении во время отскока - наблюдается один или несколько повторных ударов при увеличении с каждым последующим соударением его продолжительности и уменьшении скорости удара и глубины наибольшего внедрения. Для удара сухой прочной частицы характерна следующая закономерность между параметрами соударения: при наибольшем внедрении скорость частицы падает до 0, а поверхностное давление возрастает до максимального значения. Закономерность хорошо проявляется

при ударе частицы с $d_p/2r_d = 0,75$ (кривая 2 на рис. 5). Однако от неё заметны отклонения у меньших частиц. Эти отклонения проявляются все более при каждом последующем соударении и отскоке. Потеря скорости v_{rL}/v_{rD} , подсчитанная по скорости отскока при последнем повторном соударении, оказывается значительной. Например, для рассмотренной на рис. 5 частицы с $d_p/2r_d = 0,25$ даже в режиме абсолютно упругого соударения она составила 0,243. Для ещё более мелких частиц следует ожидать отношение v_{rL}/v_{rD} , близкое к 0, невозможность отскока от поверхности конструкции и переход в поверхностную пленку жидкости. С уменьшением $d_p/2r_d$ этот переход упрощается, так как параллельно уменьшению отношения v_{rL}/v_{rD} и повышению тормозящего действия жидкости на поверхности конструктивного элемента происходит повышение пороговой скорости отскока

$$v_{\min} = \left(\frac{3\pi\sigma}{\rho_p d_p} \right)^{0,5} \quad (25)$$

минимально необходимой для преодоления частицей силы поверхностного натяжения со стороны жидкости. Очевидно, таков механизм насыщения твердыми абразивными частицами пленок жидкости, движущихся по поверхности эродирующих конструктивных элементов проточных частей влажнопаровых турбинных ступеней и вызывающих их гидроабразивный износ.

4. Оценка эрозионно-ударного повреждения поверхности конструктивного элемента

Получаемое материалом поверхностного слоя конструктивного элемента при одиночном акте соударения покрытой жидкостью частицы эрозионно-усталостное повреждение d_1 образуется в результате суперпозиции отдельных повреждений, связанных с действием всех пиков поверхностного давления значительной амплитуды гидродина-

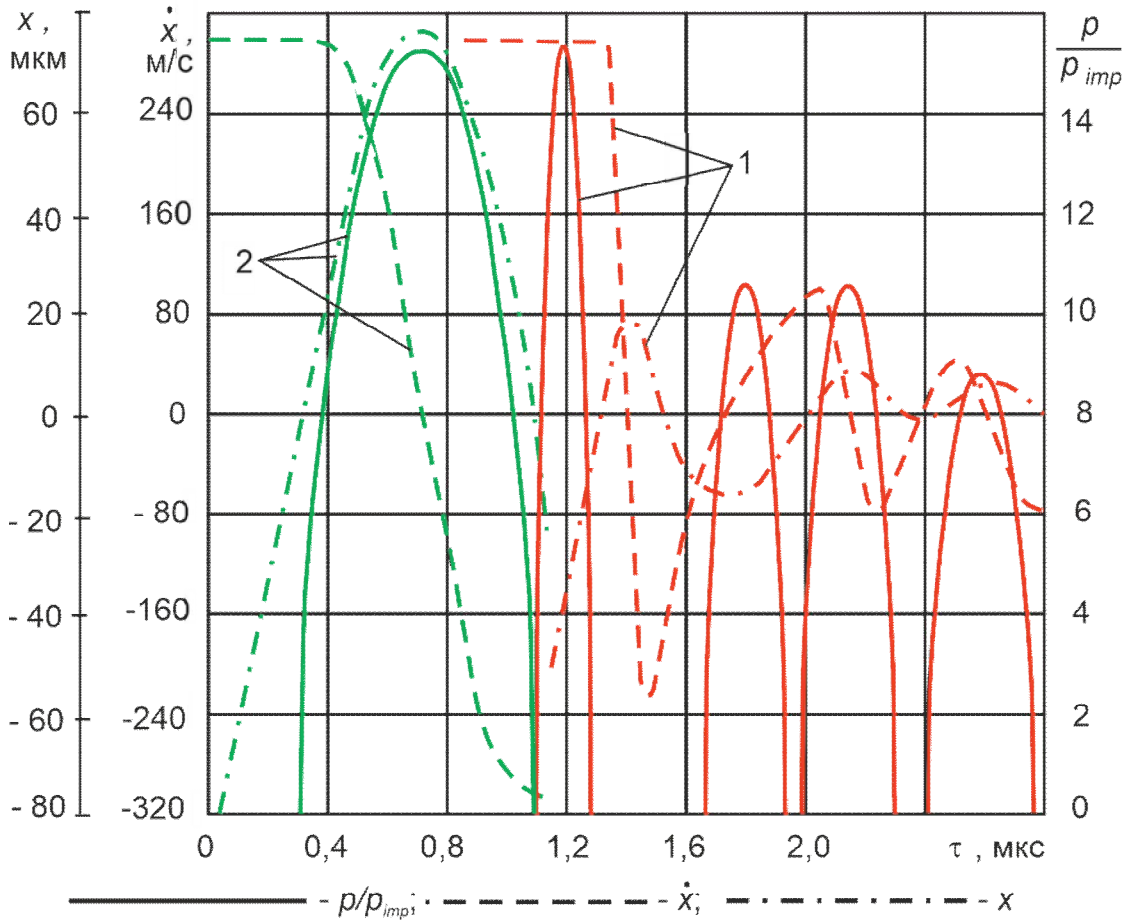


Рис. 5. Заключительная стадия соударения твердой частицы эродента с поверхностью упругого полупространства (конструктивного элемента) при ударе капли радиусом 200 мкм со скоростью 300 м/с: 1 – $d_p = 100$ мкм, $x_0 = 150$ мкм; 2 – $d_p = 300$ мкм, $x_0 = 50$ мкм

мического d_{1d} и механического при каждом возможном i -м отскоке частицы $(d_{1p})_i$:

$$d_1 = d_{1d} + \sum_i (d_{1p})_i \quad (26)$$

Так как второй и последующие возможные отскоки твердой частицы приводят к ударному нагружению разных микроплощадок поверхности конструктивного элемента, то эрозионно-усталостное повреждение d_1

от удара единичной композитной капли в пределах одной микроплощадки будет выражаться зависимостью:

$$d_1 = d_{1d} + d_{1p} \quad (27)$$

Слагаемое d_{1d} выражается зависимостью (26), в которую дополнительно вводится коэффициент

$$K_p = \begin{cases} \exp\left[-\frac{6x_0}{r_d(v'/C'+1)}\right] + \xi_{12}^{rl} (1 + \xi_{10}^{rl}) & \text{при } x_0 < x_{0,cr} \\ 1 & \text{при } x_0 \geq x_{0,cr} \end{cases} \quad (28)$$

учитывающий повышение гидродинамического давления из-за наличия в капле твердой частицы:

$$d_{1d} = \frac{1}{N_{e0} + N_e S_N} \left[K_p \left(\frac{r_d}{W'_R + N_e S_W} \right)^{1,5} v'_n (v'_R)^2 \right]^{(\bar{m} - N_e S_m)} \quad (29)$$

где N_e - уровень каплеударной эрозионной стойкости материала в пределах микроплощадки соударения с композитной каплей, который является случайной величиной с нормальным законом распределения [10, 11]; N_{e0} (S_N), \bar{W}'_R (S_W), \bar{m} (S_m) – средние значения (стандартные отклонения) вероятностных значений эрозионно-усталостных свойств материала поверхности конструктивного элемента N_{e0} , W'_R и m , введенные в рамках Единой вероятностной теории эрозионного изнашивания [12].

Входящий в (29) параметр v'_R является скоростным эквивалентом предела эрозионной выносливости в условиях каплеударного нагружения σ'_{eR} материала поверхности конструктивного элемента. По физическому смыслу она представляет собой пороговую величину нормальной составляющей скорости соударения капли минимального эрозионноопасного при данной скорости размера r_{dR} , с превышением которой материал конструктивного элемента получает эрозионно-усталостное повреждение.

Коэффициент K_p , величина которого зависит от случайного положения твердой частицы эродента в капле, наряду с эрозионно-усталостными свойствами материала, является причиной вероятностного характера величины повреждения d_{1d} .

Методологический подход к нахождению функциональной зависимости, связывающей величину повреждения d_{1p} с характерными параметрами эрозионно-ударного воздействия (скоростью и углом соударения, размером твердой частицы), аналогичен рассмотренному в [8, 11] для случая каплеударного и кавитационного разрушения. Предел эрозионной выносливости материала в условиях абразивно-ударного нагружения с учетом предложенной в [13, 14] зависимости для определения амплитуды нормальной к фронту продольной волны компоненты тензора напряжений может быть выражен следующим образом:

$$\sigma_{eR} = \frac{0,424(1-\nu)}{2\pi\nu^3(k+k_p)} \left[\frac{(1-2\nu)C_1\tau_{imp}n_m^3}{d_p x^3} \right]^{0,5}, \quad (30)$$

где x – координата, определяющая глубину расположения расчетной точки под поверхностью конструктивного элемента; n_m – максимальная глубина внедрения твердой частицы эродента в поверхностный слой конструктивного элемента; C_1 – скорость продольной волны напряжения в материале конструктивного элемента.

Зависимость (30) также содержит соответствующую σ_{eR} характеристику эрозионной стойкости - скоростной эквивалент предела эрозионной выносливости v_R . Он неявным образом присутствует в выражениях для продолжительности удара τ_{imp} и максимальной глубины внедрения частицы n_m .

Согласно (30) скоростной эквивалент v_R зависит от свойства материала конструкции σ_{eR} и размера частицы

$$\left(\frac{\tau_{imp} n_m^3}{d_p} \right)^{0,5} = \frac{2\pi\nu^3(k+k_p)\sigma_{eR} x^{1,5}}{0,424(1-\nu)^2 [(1-2\nu)C_1]^{0,5}}. \quad (31)$$

Как в случаях каплеударного и кавитационного нагружения [8], при абразивно-ударном воздействии величина σ_{eR} является линейной функцией скорости соударения частицы. Вид зависимости $\sigma_{eR} \sim v_p$ подтверждается результатами расчета по зависимостям (17) – (20) τ_{imp} и n_m для частиц из разнородных материалов и различных размеров. Часть из них приведена на рис. 6,а в виде графиков комплекса $(\tau_{imp} n_m^3)^{0,5} \sim v_p$. В широком диапазоне скоростей соударения он достаточно хорошо совпадает с прямой линией - относительная невязка составляет 0...3%. Для соотношения (31) наблюдается абсолютное качественное совпадение с аналогичной зависимостью гиперболического типа

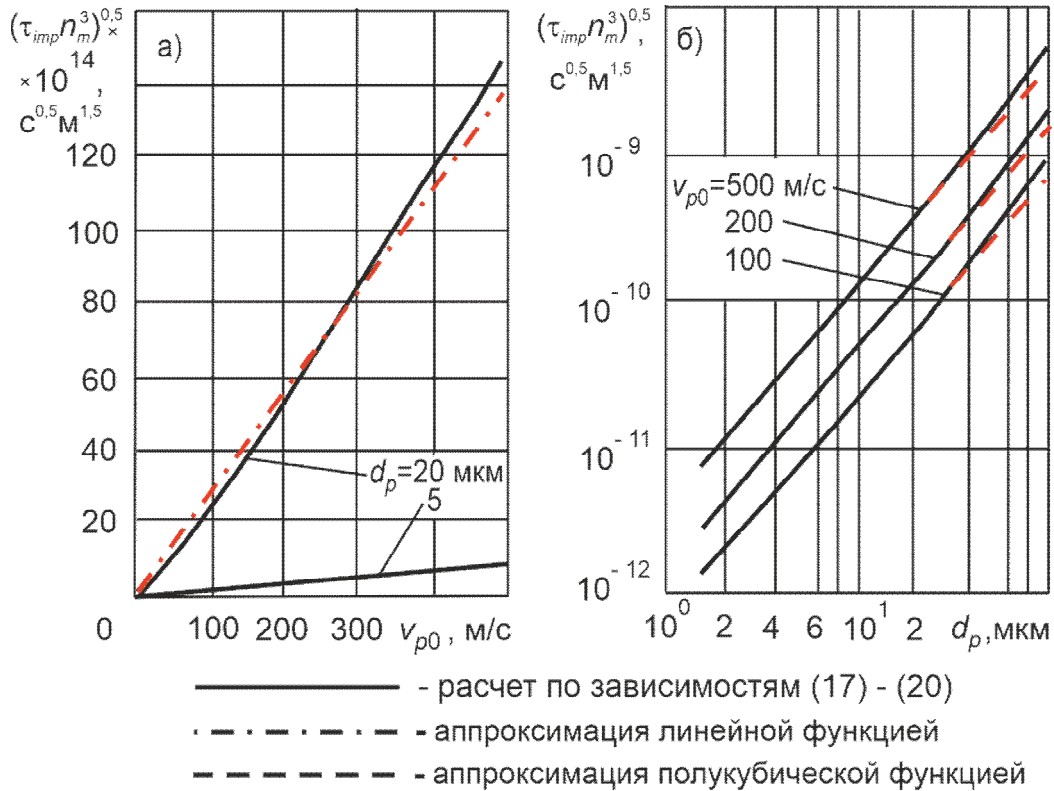


Рис. 6. Зависимость комплексных параметров соударения от скорости и размера твердой частицы эродента

$$v'_R r'_{dR}{}^{1,5} = \frac{v^3 \sigma_{eR}}{0,045(1-v)^2} \left[\frac{C'x}{(1-2v)C_1} \right]^{0,5} 1 + \frac{\rho'C'}{\rho C_1} = const, \quad (32)$$

связывающей величины v'_R и r'_{dR} в случае каплеударного и кавитационного износа, так как проведенные по зависимостям (17) – (20) расчеты соударения твердых частиц эродента (рис. 6, б) позволяют аппроксимировать соотношение (31) в виде:

$$\left(\frac{\tau_{imp} n_m^3}{d_p} \right)^{0,5} = v_{p0} d_p^2. \quad (32)$$

Отклонения начинают проявляться у достаточно больших по размеру частиц $d_p \geq 50...60$ мкм при скоростях более 400 м/с, параметры соударения которых соответствуют не рассматриваемой в данной физической модели зоне повреждения материала под действием однократного акта соударения.

Это следует рассматривать как подтверждение физической тождественности процессов накопления эрозионных повреждений поверхностного слоя конструктивных элементов в условиях механических видов эрозии - каплеударной, кавитационной, газо- и гидроабразивной.

Выявленное совпадение качественных закономерностей процессов эрозионно-усталостного повреждения материалов при различных видах эрозии позволяет по аналогии с зависимостью (29) предложить следующую зависимость для оценки величины эрозионно-усталостного повреждения для случая соударения твердых частиц эродента:

$$d_{1p} = \frac{1}{\bar{N}_{e0} + N_e S_N} \left[\left(\frac{d_p}{\bar{W}_R + N_e S_W} \right)^{1,5} v_{p0} (v_R)^2 \right]^{(\bar{m} - N_e S_m)} \quad (33)$$

причем параметры нагружения v_R и d_{pR} связаны соотношением

$$d_{pR} v_R^2 = W_R = const. \quad (34)$$

Найденное в соответствии с зависимостями (26) или (27) эрозионно-усталостное повреждение, получаемое материалом поверхностного слоя конструктивного элемента при одиночном акте соударения композитной капли жидкости с находящейся в ней твердой частицей, является основой для дальнейшего проектирования конструктивных, технологических и режимных мероприятий по предотвращению эрозии технологического оборудования [15].

5. Заключение

Проведенный теоретический анализ тех взаимосвязанных механических и гидродинамических процессов, которые последовательно-параллельно протекают при высоко-

скоростном соударении композитной капли жидкости с находящейся в ней твердой частицей с упругой поверхностью конструктивного элемента технологического оборудования, а также количественные результаты с помощью математических моделей указанных процессов показывают, что в условиях трехфазного эрозионного изнашивания нельзя рассматривать отдельно явление каплеударного нагружения и явление абразивноударного нагружения. На параметры эрозионно-ударного нагружения и повреждения поверхности конструктивных элементов оказывают взаимное комплексное влияние все контактирующие фазы. Это делает невозможным простой перенос на условия трехфазного эрозионного изнашивания результатов исследований и методов прогнозирования либо только каплеударного, либо только газоабразивного эрозионного изнашивания.

Список литературы

1. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки. М.: Издательство МЭИ, 2006. 539 с.
2. Зарубина Н.В., Карницкий Н.Б. Турбинные установки ТЭС и АЭС. Устройство, эксплуатация и ремонт. Минск: Вышэйшая школа», 2024. 431 с.
3. Сумм Б.Ю., Горюнов Ю.В. Физико-химические основы смачивания и растекания. М.: Химия, 1976. 232 с.
4. Mechanisms of Sand and Dust Erosion in Gas Turbine Engines (DTIC AD0876584). Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1969.
5. Эрозия / Под ред. К.Прис. М.: Мир, 1982. 464 с.
6. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
7. Lesser M.B., Field Y.E. The geometric wave theory of liquid impact // Proc. 6th Int. Conf. on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 5 – 8 Sept. 1983. P. 17/1–17/9.
8. Лагерев А.В. Вероятностная теория

References

1. Trukhniy A.D., Lomakin B.V. *Teplofikatsionnye parovye turbiny i turboustanovki* [Thermal steam turbines and turbine installations]. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2006. 539 p. (In Russian)
2. Zarubina N.V., Karnitskiy N.B. *Turbinnye ustanovki TES i AES. Ustroystvo, ehkspluatatsiya i remont* [Turbine installations of thermal power plants and nuclear power plants. Device, operation and repair]. Minsk, Vyshcheyshaya shkola, 2024. 431 p. (In Russian)
3. Summ B.Yu., Goryunov Yu.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physico-chemical bases of wetting and spreading]. Moscow, Khimiya, 1976. 232 p. (In Russian)
4. Mechanisms of Sand and Dust Erosion in Gas Turbine Engines (DTIC AD0876584). Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1969.
5. Treatise on materials science and technology. Volume 16. Erosion. Bell Telephone Laboratories, Inc., 1979.
6. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Ko-

‡ [Erosion of steam turbines: a probabilistic approach: in 3 vol. Vol. 3. Prevention of steam turbine erosion]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2006. 255 p. DOI: 10.5281/zenodo.1311907 (In Russian)