

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ФАРФОРА С ПОВЫШЕННЫМИ ПРОЧНОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В.И. Абрамов, инж., **Е.В. Штефан**, **Н.Г. Крищук**, кандидаты техн. наук
НИИВН — УГУПТ — НТУУ «КПИ»

Одним из основных требований к высоковольтным стержневым изоляторам являются высокая прочность и долговечность, которые в значительной степени зависят от рациональной организации всего технологического процесса изготовления фарфоровых изоляционных деталей. Основа технологии производства высоковольтных стержневых изоляторов — процесс пластической обработки и формования (мундштучного прессования фарфоровой массы).

Мундштучное прессование керамических масс

Основой управления технологическими свойствами керамических масс является способ их образования или технологический процесс, определяемый воздействием различных внешних факторов: физико-механической модификации поверхности раздела фаз (физико-химические процессы в массе, введение добавок, составление смесей), механической обработки в агрегатах, давления и температуры [1–3].

Выбор воздействий и порядок их чередования, т.е. подбор и модификация обрабатывающих машин, их расстановка в технологической линии, определяющая наиболее эффективную последовательность разнообразных механических воздействий на керамическую массу, правильное чередование воздействий (образование гидратных пленок, диспергирование глинистых частиц, завершение этих реакций во всем объеме обрабатываемой массы) определяют качественные показатели технологического процесса [3].

Важнейший технологический этап пластической обработки и формования фарфоровой массы имеет своей целью образование такой коагуляционной структуры, которая по механическим свойствам может служить основой для получения высокопрочных электроизоляционных изделий [1–3].

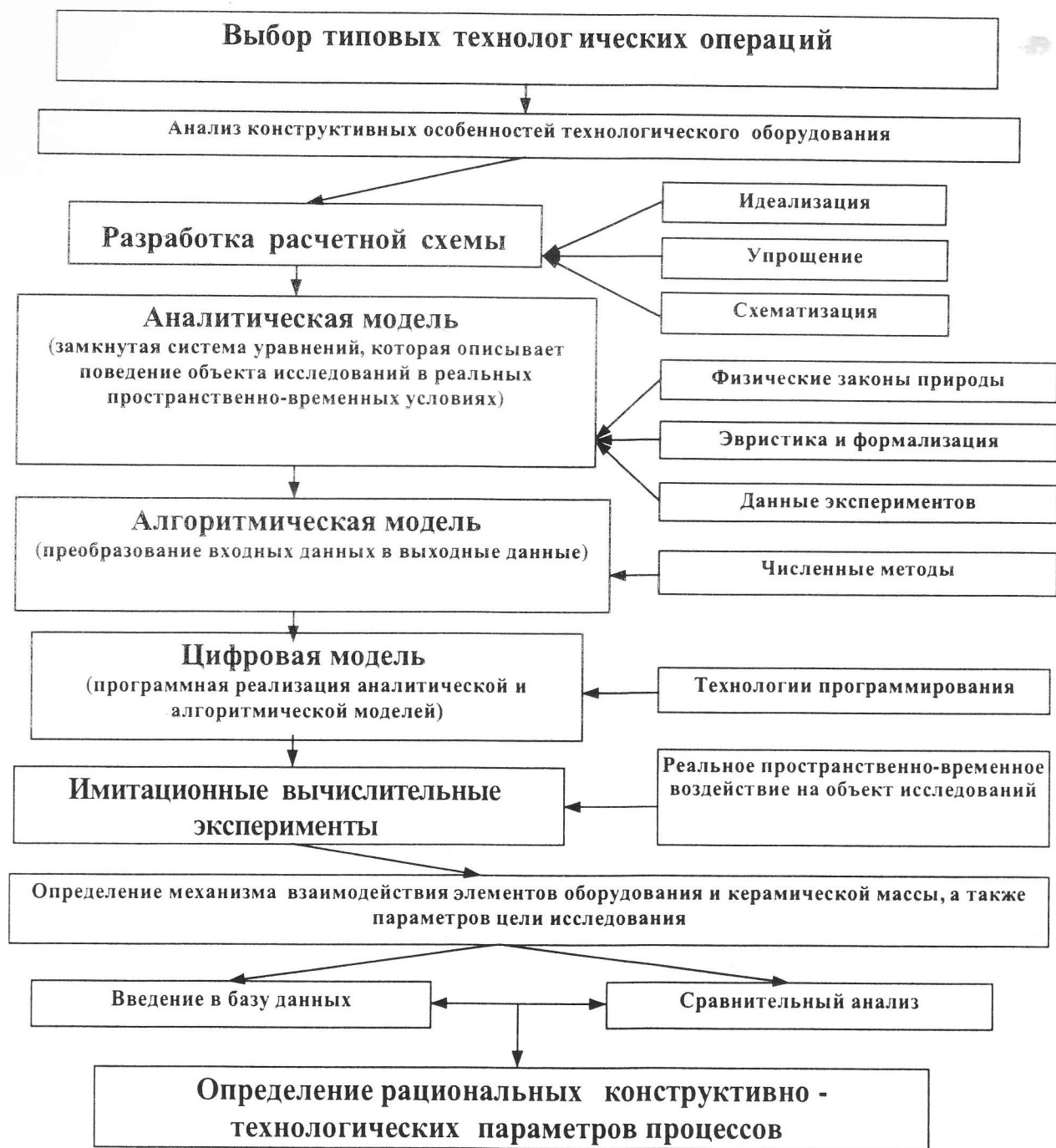
Особенности проектирования процессов деформирования пластичных керамических масс

До настоящего времени в основном применяется экспериментальный подход к исследованию структурообразования тиксотропных систем и дальнейшему совершенствованию технологического оборудования [1–3].

Разработан теоретический подход к выбору рациональных конструктивно-технологических параметров оборудования для получения упрочненного фарфора. Переход от эмпирических методов к современным компьютерным технологиям в виде информационных технологий проектирования (ИТП) [4] процессов упруговязкопластического деформирования тиксотропных твердообразных материалов позволяет рассматривать технологический процесс в виде многокомпонентной системы взаимосвязанных объектов исследования: керамической массы, элементов технологического оборудования, термомеханического нагружения и др. Принципиальная схема ИТП типа «математическая модель — интеллектуальная экспертная система — методика проектирования» представлена на рисунке.

Аналитическая модель. Формулировка краевой задачи упруговязкопластичности применительно к процессам неупругого деформирования пористых керамических масс

Рассматривая процесс неупругого деформирования пористого материала, предполагаем, что его конфигурации в момент времени t соответствует область V , ограниченная поверхностью Ω . Фарфоровая масса рассматривается как двухфазный материал: 1-я фаза [агрегаты + вода] и 2-я фаза [воздух, адсорбированный



Схематический вариант ИТП

на поверхности глинистых частиц и механически захваченный при увлажнении].

Режим силового нагружения тела в произвольной точке x задаем в виде двух основных типов граничных условий:

на части границы $\Omega_1 \in \Omega$ заданы скорости

$$\vec{V}|_{\Omega_1} = \vec{V}(x);$$

на части границы $\Omega_2 \in \Omega$ заданы усилия

$$\vec{P}|_{\Omega_2} = \vec{P}(x).$$

В каждой точке области V должны выполняться:

уравнение равновесия $\sigma_{ij,k} + \rho F_i = 0$;

уравнение неразрывности $\ln \dot{\rho} + \text{div} \vec{u} = 0$;

кинематические соотношения $\dot{\epsilon}_{ik} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,k} + \dot{u}_{k,i})$,

где σ_{ik} , $\dot{\epsilon}_{ik}$ — тензоры соответственно напряжений и скоростей деформаций; $\vec{u}$, $\vec{F}$ — векторы соответственно перемещений и усилий; ρ — относительная плотность материала; «точка» означает субстанциональную производную по времени.

При формулировке определяющих соотношений предполагаем, что механическая мощность P в процессе деформирования может быть разделена на обратимую P^0 и необратимую P^H составляющие, т.е. $P = P^0 + P^H$.

При этом составляющая P^0 может быть определена посредством функционала свободной энергии $\phi = e - TS$ и компонентами тензора скоростей обратной (упругой) деформации $\dot{\epsilon}_{ik}^e$:

$$P^0 = \frac{\partial \phi}{\partial \epsilon_{ik}^e}, \quad (1)$$

где e — внутренняя энергия; T — абсолютная температура; S — энтропия; $\frac{\partial \phi}{\partial \epsilon_{ik}^e}$ имеет смысл внутренних напряжений σ_{ik} в деформируемом теле.

Из формулы (1) вытекает известное уравнение состояния упругого тела (закон Гука), которое для изот-

ропного материала имеет вид

$$\dot{\epsilon}_{ik}^e = \frac{1+\nu}{E} \left(\dot{\sigma}_{ik} + \frac{\nu}{1+\nu} \dot{\sigma}_{ll} \delta_{ik} \right), \quad (2)$$

где E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона.

Неравновесная составляющая мощности P^H определяется диссипативным механизмом необратимого процесса деформирования в форме закона для плотности производства энтропии ρ_S в объеме текущей конфигурации тела (неравенство Клаузиуса-Дюгема):

$$\rho_S = D_q + D_M + D_0 \geq 0, \quad (3)$$

где $J_q = J_q \text{grad} \left(\frac{1}{T} \right)$ — функция тепловой диссипации с тепловым потоком J_q ; $J_M = \frac{\rho}{T} P^H$ — функция

механической диссипации; $J_0 = \frac{\rho^q}{T}$ — функция объемной диссипации, обусловленная наличием внутренних источников энергии q^V .

Принимая во внимание гипотезу о существовании некоторой поверхности Φ , определенной в пространстве напряжений как граница обратимого и необратимого состояний, функцию механической диссипации представим в виде

$$D_M = \mu(\Phi) \Phi, \quad (4)$$

где $\mu(\Phi)$ — некоторый множитель.

Основываясь на формуле (4), получим следующую систему определяющих соотношений необратимо деформируемого материала

$$\begin{aligned} P^H &= \sigma_{ik} \cdot \dot{\epsilon}_{ik}^H; \\ \epsilon_{ik}^H &= \mu(\Phi) \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma_{ik}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Потенциал Φ , определяющий условие перехода процесса деформирования изотропного пористого материала из обратимого в необратимое (или наоборот), представим в виде

$$\Phi(p, \tau, \theta, k) = \frac{\tau^2}{\phi} + \frac{p^2}{\psi} - (1 - \theta)k^2 = 0, \quad (6)$$

где P — уровень гидростатического давления в материале; τ^2 — второй инвариант девиатора напряжений, $t^2 = \frac{1}{2} S_{ik} S_{ik}$; φ, ψ, θ — функции пористости, зависящие от свойств материала [5]; K — предел текучести твердой фазы материала.

Полагая, что $\theta=0$; $\varphi = \frac{1}{3}$; $\psi=\infty$, получим условие текучести Мизеса, описывающее процесс упругопластического деформирования изотропного идеального (беспористого) несжимаемого материала.

Подстановка формулы (6) в формулу (5) дает

$$\dot{\epsilon}_{ik}^H = \frac{\mu(\Phi)}{\psi\varphi} \left[\psi\sigma_{ik} + \left(\frac{2}{3}\varphi - \psi \right) p\delta_{ik} \right]. \quad (7)$$

Преобразуя формулу (7), получим

$$\sigma_{ik} = \frac{1}{\mu(\Phi)} \left[\varphi\dot{\epsilon}_{ik}^H + \left(\psi - \frac{1}{3}\varphi \right) e^H \delta_{ik} \right], \quad (8)$$

где $e^H = \dot{\epsilon}^H$.

Рассматривая процесс неравновесного необратимого деформирования, считаем, что тензор напряжений σ_{ik} может быть представлен в виде суммы равновесной (σ_{ik}^p) и неравновесной (σ_{ik}^V) составляющих:

$$\sigma_{ik} = \sigma_{ik}^p + \sigma_{ik}^V. \quad (9)$$

Особенностью данной модели является то, что понятие установившегося (равновесного) упруговязкопластического течения оказывается альтернативным описанию упругопластического поведения.

Равновесную составляющую тензора напряжений определяем на основании формулы (8):

$$\sigma_{ik}^p = \frac{\sqrt{\rho}K}{\sqrt{\varphi\gamma^2 + \psi e^2}} \left[\varphi\dot{\epsilon}_{ik}^H + \left(\psi - \frac{1}{3}\varphi \right) e^H \delta_{ik} \right], \quad (10)$$

где γ — второй инвариант девиатора скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{ik}$.

Вязкую (неравновесную) составляющую тензора напряжений определяем также на основании формулы (8):

$$\sigma_{ik}^V = 2\eta_k \left[\varphi\dot{\epsilon}_{ik}^H + \left(\psi - \frac{1}{3}\varphi \right) e^H \delta_{ik} \right], \quad (11)$$

где η_k — коэффициент вязкости твердой фазы материала.

Подставляя формулы (10) и (11) в формулу (9), получим определяющие соотношения вязкопластичности в виде

$$\sigma_{ik} = \left(\frac{\sqrt{\rho}K}{\sqrt{\varphi\gamma^2 + \psi e^2}} + 2\eta_k \right) \left[\varphi\dot{\epsilon}_{ik}^H + \left(\psi - \frac{1}{3}\varphi \right) e^H \delta_{ik} \right]. \quad (12)$$

Преобразуя формулу (12), получим

$$\dot{\epsilon}_{ik}^H = \frac{\sqrt{\varphi\gamma^2 + \psi e^2}}{\varphi\psi \left(\sqrt{\rho}K + 2\eta_k \sqrt{\varphi\gamma^2 + \psi e^2} \right)} \times \\ \times \left[\psi\sigma_{ik} + \left(\frac{1}{3}\varphi - \psi \right) p\delta_{ik} \right]. \quad (13)$$

Альтернативный вариант определяющих соотношений типа формулы (13) можно получить на основе закона течения (5), полагая, что

$$\mu(\Phi) = \frac{1}{\eta_k} \langle f(\Phi) \rangle, \quad (14)$$

$$\text{где } \langle f(\Phi) \rangle = \begin{cases} f(\Phi) & \text{при } \Phi > 0; \\ 0 & \text{при } \Phi \leq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Функцию $f(\Phi)$ принимаем в виде

$$f(\Phi) = \left(\frac{\sqrt{\frac{\rho^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi}}}{\sqrt{\rho}K} \right)^m. \quad (16)$$

Таким образом, соотношение (5) с учетом формул (14) и (16) примет вид

$$\dot{\epsilon}_{ik}^H = \frac{1}{2\eta_k} \left\langle \frac{\sqrt{\frac{\rho^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\varphi}} - \sqrt{\rho}K}{\psi\varphi\sqrt{\rho}K} \right\rangle \left[\psi\sigma_{ik} + \left(\frac{1}{3}\varphi - \psi \right) p\delta_{ik} \right]. \quad (17)$$

Представленной выше модели неравновесного необратимого процесса деформирования среды можно поставить в соответствие физический механизм вязкопластического поведения материала.

Получение определяющих соотношений упруговязкопластического поведения материала возможно на основе компиляции моделей сред в виде формулы (2) и формулы (13) или (17). Для этого воспользуемся временной конечно-разностной дискретизацией процесса деформирования. С учетом 2-слойной аппроксимации производной по времени вектор скорости деформации $\{\dot{\epsilon}^H\}$ в текущий момент времени t ($t_n \leq t \leq t_{n+1}$) определяем линейной комбинацией соответствующих векторов на n -м и $n+1$ -м временных слоях:

$$\{\dot{\epsilon}^H\} = (1 - \bar{\omega})\{\dot{\epsilon}^H\}_n + \bar{\omega}\{\dot{\epsilon}^H\}_{n+1}, \quad (18)$$

где $\bar{\omega} = \frac{t - t_n}{\Delta t}$ - весовой множитель, ($0 \leq \bar{\omega} \leq 1$);

$$\{\dot{\sigma}\} = [D^{evp}]_n \{\dot{\epsilon}\} - \{VP\}_n, \quad (19)$$

где $[D^{evp}]_n$ - конституциональная матрица упруговязкопластичности; $\{VP\}_n$ - вектор скоростей неравновесных напряжений.

Граничные и начальные условия задаются в соответствии с конкретным процессом (его параметрами), расчетной схемой и другими условиями.

Алгоритмическая модель. Применение проекционно-сеточных методов решения

Для решения сформулированной краевой задачи, формулы (12) - (19), используем проекционно-сеточные методы в форме методов конечных элементов (МКЭ) по пространственным переменным и конечных разностей (МКР) по временному аргументу.

В результате пространственной дискретизации на основе МКЭ и конечно-разностного представления времени релаксации напряжений получим «дискретный» аналог вариационного уравнения для момента времени t_n , заменяя его суммой вкладов отдельных элементов в количестве N_e :

$$\sum_1^{N_e} \int_{V_n^e} [B]^T [D]_n [B]_n \{\dot{u}\} dV - \sum_1^{N_e} \int_{V_n^e} [B]^T \{VP\}_n dV - \\ - \sum_1^{N_e} \int_{V_n^e} [N]^T \{\dot{F}\}_n dV - \sum_1^{N_e} \int_{\Omega_n^e} [N]^T \{\dot{P}\}_n \{n\} d\Omega = 0,$$

или в матричной форме

$$[K]_n \{\dot{u}\} = \{\dot{Q}^f\}_n + \{\dot{Q}^p\}_n + \{\dot{Q}^{vp}\}_n, \quad (20)$$

где $[K]_n$ - матрица жесткости для системы элемен-

тов, $[K]_n = \sum_1^{N_e} \int_{V_n^e} [B]^T [D]_n [B]_n \{\dot{u}\} dV$; $\{\dot{Q}^p\}_n$ - вектор

скоростей изменения узловых сил, эквивалентных изменению поверхностной нагрузки,

$\{\dot{Q}^p\}_n = \sum_1^{N_e} \int_{\Omega_n^e} [N]^T \{\dot{P}\}_n \{n\} d\Omega = 0$; $\{\dot{Q}^f\}_n$ - вектор скорос-

тей изменения узловых сил, эквивалентных измене-

нию объемной нагрузки, $\{\dot{Q}^f\}_n = \sum_1^{N_e} \int_{V_n^e} [N]^T \{\dot{F}\}_n dV$;

$\{\dot{Q}^p\}_n$ - вектор скоростей изменения узловых сил, эквивалентных изменению неравновесных напряже-

ний, $\{\dot{Q}^{vp}\}_n = \sum_1^{N_e} \int_{V_n^e} [B]^T \{VP\}_n dV$.

Отметим, что $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$ определяет временной интервал численной реализации релаксационных механизмов, обусловленных неравновесностью процесса деформирования.

Следуя конечно-разностному по времени подходу, осуществляем численное интегрирование формулы (20) на временном интервале $\Delta t_m = t_{m+1} - t_m$. От-

метим, что Δt_m в данном случае определяет дискретный временной интервал при численной реализации заданного закона силового нагружения и в общем случае не совпадает с Δt_n : $\Delta t_m \geq \Delta t_n$. Таким образом, имеем:

$$\{u\}_{m+1} = \{u\}_m + (1 - \omega)([K]_n^{-1})_n ((\{Q\}_n)_{m+1} - (\{Q\}_n)_m) + \\ + \omega([K]_n^{-1})_{m+1} ((\{Q\}_n)_{m+1} - (\{Q\}_n)_m),$$

где $0 \leq \omega \leq 1$ определяет вид разностного оператора.

Принятая пространственно-временная дискретизация в математической модели задачи обуславливает переход от скоростей изменения параметров $\{\dot{Q}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{\dot{\epsilon}\}$, $\{\dot{\sigma}\}$ к их приращениям: $\{\Delta Q\}$, $\{\Delta u\}$, $\{\Delta \epsilon\}$, $\{\Delta \sigma\}$,

т.е. переход от пространственного («Эйлера») к материальному («Лагранжевому») способу описания движения деформируемого тела.

Разработка вычислительного алгоритма

Моделирование процесса неупругого деформирования фарфоровых масс реализуется посредством разработанного вычислительного алгоритма, основанного на поэтапном (шаговом) рассмотрении движения тела в неподвижной системе отсчета. На каждом шаге нагружения осуществляется перестройка сетки конечных элементов. При этом все параметры, характеризующие поведение тела в процессе деформирования, рассчитываются по отношению к начальной для каждого шага нагружения конечноэлементной модели тела.

Цифровая модель. Реализация разработанных алгоритмов

Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного вычислительного комплекса MASSA. Использование современной 32-разрядной архитектуры в среде WINDOWS позволяет производить вычисления практически неограниченной сложности — мощность решаемых задач варьируется в широких пределах и достигает десятков тысяч узлов. Программ-

ный комплекс предназначен для моделирования неравновесных процессов деформирования тиксотропных твердообразных двухфазных структур при известном законе нагружения в режиме упруго-вязкопластического поведения твердой фазы.

Разработанное программное обеспечение позволяет на каждом этапе формирования определять основные характеристики состояния массы (степень разрушения и тиксотропии структуры [6], ориентацию структуры массы, изменение пористости в процессе обработки), напряженно-деформированное состояние массы (тензоры напряжений и деформаций, скорость и перемещение любой точки массы), суммарное усилие на деформирующем инструменте, уровень гидростатического давления и др.

Выводы

Использование современных информационных технологий проектирования позволяет значительно ускорить, удешевить процесс разработки и внедрения надежного и экономичного технологического оборудования, в том числе машин и агрегатов для пластической обработки и формирования керамических масс (фарфоровой массы для изготовления высококачественного электротехнического фарфора).



Список литературы

1. Ничипоренко С.П., Абрамович М.Д., Комская М.С. О формировании керамических масс в ленточных прессах. - К.: Наук.думка, 1971.
2. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотропных систем. - К.: Наук.думка, 1972.
3. О выборе технологии производства керамических масс /Быхова А.Ф., Ничипоренко С.П., Хилько В.В. и др. - Киев: Наукова думка, 1980. - 52с.
4. Штефан Е.В. Розроблення інформаційних технологій проектування машин та апаратів харчових виробництв // Розроблення та впровадження прогресивних ресурсощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість: Тези доп. Міжнар.наук.конф., 21-24 жовт., 1997. - К.: УДУХТ, 1997. - 208с.
5. Perzyna P. Fundamental problems in viscoplasticity. Advances in Applied Mechanics. - Academic Press., 1966. - Vol 9. - P.243-277.
6. Овчинников П.Ф. Виброреология. - К.:Наук.думка, 1983.-272с.

© Абрамов В.И., Штефан Е.В., Кришук Н.Г., 1999