

УДК 539.3

## **КИНЕТИКО-ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ**

**О.Г. ОСЯЕВ, Ю.А. ТАТУРИН, А.М. КОСТИН, А.В. ЖУКОВ**

(Ростовский военный институт ракетных войск)

*Получены кинетические и полуэмпирические выражения для функции ползучести в физических уравнениях теории старения и кинетической теории прочности при сложном напряженно-деформированном состоянии, а также для операторного модуля вязкоупругости и операторного модуля вязкого сдвига.*

**Ключевые слова:** кинетико-феноменологическая модель, прочность, вязкоупругость, ползучесть, полимерный композит.

**Введение.** Современные несущие конструкции автомобильной, авиационной, ракетно-космической и других видов техники изготавливаются из композиционных материалов, позволяющих добиться реализации сложных конструкторских задач для достижения многофункциональности, оптимизации массово-геометрических, экономических и других характеристик. При этом основной задачей проектирования является расчет длительной прочности несущих конструкций в условиях продолжительной эксплуатации. Трудность решения этой проблемы состоит в необходимости учета ползучести полимерных композитных материалов при сложном напряженно-деформированном состоянии в условиях многофакторного воздействия нагрузки.

В связи со сложными условиями работы полимерных материалов в конструкциях установление связи между напряжениями и деформациями при произвольном характере нагружения вязкоупругого тела представляет собой одну из основных проблем механики полимеров [1-8]. Система уравнений, выражающая отмеченную связь, представляет математическую модель механических свойств материала.

Для высоконаполненных полимеров такие модели прошли путь от дискретных до нелинейных вязкоупругих моделей наследственного типа. Однако обобщение и анализ экспериментальных данных, полученных для различных режимов испытаний материалов [1, 9, 10], показали, что принцип суперпозиции для высоконаполненных полимеров не выполняется, а построенные на его основе наследственные теории вязкоупругости не вполне пригодны для описания реального поведения материала. Кроме того, как правило, в процессе нагружения наполненного полимера изменяются его механические свойства. При повторном нагружении поведение материала зависит от характера предшествующего нагружения. Экспериментально установлено, что вязкоупругое поведение полимерного композитного материала при нагружении обусловлено вязкоупругостью полимерной матрицы и нарушением сплошности системы [1, 9, 10, 14]. В настоящее время не существует методов непосредственного измерения степени накопленной внутренней поврежденности рассматриваемых материалов [1].

Процессы старения полимеров и накопление повреждений в конструкциях при длительной эксплуатации дают основания применять модели и методы механики разрушений для исследования этих процессов [15-17]. Однако имеющиеся методы и подходы не учитывают такие важные особенности развития поврежденности в полимерах, как диффузное проникновение легких фракций через свободные поверхности. Технология полимеризации не исключает появления внутренних полостей или свободных поверхностей внутри материала. Наиболее активные изменения свойств, происходящие на этих поверхностях, в том числе и во внутренних микрополостях материала, не учитываются в известных моделях полимеров. Для создания адекватных моделей напряженно-деформированного состояния конструкций из полимерных композитов необходимо учитывать поведение отдельных слоев вязкоупругопластических материалов, с учетом особенностей

временных изменений свойств этих материалов. Это обстоятельство требует учета кинетики химических процессов в полимерах [12]. Множество факторов, характеризующих воздействие среды на состояние сложных конструкций, требует применения комплексных и обобщенных методов расчета, согласующихся между собой и с данными экспериментальных исследований. Созданию таких методов посвящено сравнительно небольшое число работ [18-20]. Проблема многофакторного анализа до сих пор остается открытой по причине лишь частичного рассмотрения вопросов, связанных с построением моделей комплексной оценки сложных систем. Полная модель прочностной надежности включает в себя, по меньшей мере, четыре составляющих, характеризующих свойства материала, конструкции, нагрузки и критерии прочности. Рассмотрению особенностей многослойных конструкций посвящены работы [4, 7, 11, 13, 19-23]. Однако практических алгоритмов реализации методов расчета многослойных анизотропных конструкций намного меньше [11, 13]. Сложность создания вычислительных алгоритмов состоит в накоплении систематических и случайных ошибок при больших объемах вычислительных операций, отсутствии достоверных сопутствующих корректирующих и управляющих моделей, способных устранять погрешности вычислений. Отдельную проблему составляет снижение временных затрат и оптимизация процессов вычислений. Кроме того, решение комплексных задач требует применения и комплексных методов их решения, а также правильного определения условий взаимодействия этих методов, исходя из достоверной физической и математической интерпретации условий краевых задач.

Таким образом, задача практической реализации расчетных методов исследования многослойных композитных конструкций, учитывающих все рассматриваемые составляющие комплексной модели прочностной надежности при сложном напряженно-деформированном состоянии, остается в настоящее время не решенной.

С этой целью рассмотрим способ перехода от модели ползучести материала при сложном напряженно-деформированном состоянии к модели вязкоупругости на основе принципа соответствия путем определения выражений для операторного модуля вязкоупругости и операторного модуля вязкого сдвига. Для получения указанных выражений определим функцию ползучести с помощью кинетических уравнений [12] и эмпирических констант [10].

**Уравнения ползучести на основе теории старения и кинетической теории при сложном напряженно-деформированном состоянии.** Полная система уравнений теории ползучести, так же, как и в теории упругости и пластичности, включает три основных группы уравнений: равновесия или движения, уравнения физические и геометрические. Рассмотрим уравнения ползучести на основе теории старения и кинетической теории для полимерных композитных материалов (ПКМ), например для конструкций летательных аппаратов, находящихся в условиях длительной эксплуатации и стационарного термосилового нагружения (ТСН).

Уравнения равновесия в тензорном виде:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + X_i = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Геометрические уравнения Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$ ,  $u_i$  – соответственно компоненты тензоров напряжений, деформаций, перемещений;  $x_i$  – переменные осей координат;  $X_i$  – компоненты объемных сил в направлениях  $x_i$ .

Физические соотношения в предположении, что мгновенные деформации являются упругими, кривые ползучести – подобными, что существует степенная зависимость деформаций ползучести от напряжений, удобно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \varepsilon_T + \frac{3}{2} \sigma_i^{n-1} \Omega(t) (\sigma_{11} - \sigma_{cp});$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{22} &= \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \mu(\sigma_{33} + \sigma_{11})] + \varepsilon_T + \frac{3}{2} \sigma_i^{n-1} \Omega(t) (\sigma_{22} - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_{33} &= \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})] + \varepsilon_T + \frac{3}{2} \sigma_i^{n-1} \Omega(t) (\sigma_{33} - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_{12} &= \frac{\sigma_{12}}{G} + 3\sigma_i^{n-1} \Omega(t) \sigma_{12}; \\ \varepsilon_{23} &= \frac{\sigma_{23}}{G} + 3\sigma_i^{n-1} \Omega(t) \sigma_{23}; \\ \varepsilon_{13} &= \frac{\sigma_{13}}{G} + 3\sigma_i^{n-1} \Omega(t) \sigma_{13}.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь  $\varepsilon_T$  – температурные деформации;  $\sigma_{cp} = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$  – среднее напряжение;  $\Omega(t) = \frac{\varepsilon_i^{\text{II}}}{\sigma_i^n}$  – функция ползучести;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $\varepsilon_i^{\text{II}}$  – интенсивность деформаций ползучести.

Функцию ползучести и температурные деформации определим с помощью кинетических уравнений [12]. В соответствии с [10], деформация ползучести может быть определена в виде произведений функций:

$$\varepsilon^{\text{II}}(\sigma, t) = \psi(\sigma)\Omega(t). \quad (4)$$

В практических расчетах функцию  $\psi(\sigma)$  считают степенной:

$$\psi(\sigma) = \sigma^n, \quad (5)$$

где  $n > 1$  – постоянная для данной температуры и материала величина.

Используя полученные выше выражения для деформаций ползучести, определяем выражения для функций  $\psi(\sigma), \Omega(t)$ . Экспоненциальную функцию  $\varepsilon^{\text{II}}$  можем записать через эмпирические константы [10]:

$$\varepsilon^{\text{II}} = \frac{1}{E} \lambda \beta \sigma_0 t e^{-\lambda t} = \frac{\beta}{\eta} \sigma_0 t e^{-\lambda t} = \psi(t)\Omega(t). \quad (6)$$

Тогда, в соответствии с выражениями для напряжений, получим:

$$\psi(\sigma) = \beta \sigma_0; \quad (7)$$

$$\Omega(t) = \frac{1}{E} \lambda t e^{-\lambda t} = \frac{1}{\eta} t e^{-\lambda t}. \quad (8)$$

В кинетическом виде искомые функции можно определить с помощью уравнений [12]:

$$\varepsilon^{\text{II}} = \frac{t}{\eta} \sigma \ln \frac{t}{\tau_0} = \psi(t)\Omega(t). \quad (9)$$

Сравнивая полученные уравнения (8) и (9), запишем аналогичные по виду кинетические функции:

$$\psi(\sigma) = \sigma; \quad (10)$$

$$\Omega(t) = \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0}. \quad (11)$$

В соответствии с теорией старения, сомножитель  $\sigma_i^{n-1}\Omega(t)$  в выражении (3) определяется соотношением:

$$\sigma_i^{n-1}\Omega(t) = \frac{\varepsilon_i''}{\sigma_i}. \quad (12)$$

Тогда согласно (6)-(11) сомножитель (12) можно записать:

– через эмпирические коэффициенты:

$$\sigma_i^{n-1}\Omega(t) = \frac{\varepsilon_i''}{\sigma_i} = \frac{\sigma_0}{E\sigma_i} \lambda \beta t e^{-\lambda t} = \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} t e^{-\lambda t}, \quad (13)$$

– согласно кинетической теории:

$$\sigma_i^{n-1}\Omega(t) = \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0}. \quad (14)$$

Используя полученные выражения (13), (14), а также кинетическое выражение для температурных деформаций [12], можем записать для каждого фиксированного момента времени  $t$  систему физических уравнений теории старения в полуэмпирическом виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \alpha \Delta T + \frac{3}{2} \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} t e^{-\lambda t} (\sigma_{11} - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \mu(\sigma_{33} + \sigma_{11})] + \alpha \Delta T + \frac{3}{2} \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} t e^{-\lambda t} (\sigma_{22} - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_{33} &= \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})] + \alpha \Delta T + \frac{3}{2} \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} t e^{-\lambda t} (\sigma_{33} - \sigma_{cp}); \\ \varepsilon_{12} &= \sigma_{12} \left( \frac{1}{G} + 3 t e^{-\lambda t} \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} \right); \\ \varepsilon_{23} &= \sigma_{23} \left( \frac{1}{G} + 3 t e^{-\lambda t} \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} \right); \\ \varepsilon_{13} &= \sigma_{13} \left( \frac{1}{G} + 3 t e^{-\lambda t} \frac{\beta \sigma_0}{\eta \sigma_i} \right), \end{aligned} \quad (15)$$

или, согласно выражению (14), полученному на основе кинетического подхода

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{1}{E} [\sigma_{11} - \mu(\sigma_{22} + \sigma_{33})] + \ln \frac{t}{\tau_0} \left[ \frac{\alpha k T}{C} + \frac{3}{2} (\sigma_{11} - \sigma_{cp}) \frac{t}{\eta} \right]; \\ \varepsilon_{22} &= \frac{1}{E} [\sigma_{22} - \mu(\sigma_{33} + \sigma_{11})] + \ln \frac{t}{\tau_0} \left[ \frac{\alpha k T}{C} + \frac{3}{2} (\sigma_{22} - \sigma_{cp}) \frac{t}{\eta} \right]; \\ \varepsilon_{33} &= \frac{1}{E} [\sigma_{33} - \mu(\sigma_{11} + \sigma_{22})] + \ln \frac{t}{\tau_0} \left[ \frac{\alpha k T}{C} + \frac{3}{2} (\sigma_{33} - \sigma_{cp}) \frac{t}{\eta} \right]; \\ \varepsilon_{12} &= \sigma_{12} \left( \frac{1}{G} + 3 \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0} \right); \\ \varepsilon_{23} &= \sigma_{23} \left( \frac{1}{G} + 3 \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0} \right); \\ \varepsilon_{13} &= \sigma_{13} \left( \frac{1}{G} + 3 \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0} \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Анализ полученных уравнений показывает, что в физических уравнениях для деформаций сдвига последний множитель играет роль операторного модуля сдвига  $\bar{G}$  теории вязкоупругости, соответствующего модулю сдвига  $G$  в теории упругости, по аналогии с определенным ранее операторным модулем упругости  $\bar{E}$ .

В соответствии с полученными кинетическими и полуэмпирическими уравнениями (15) и (16) теории старения, можем записать выражения для операторного модуля сдвига:

– в полуэмпирическом виде:

$$\bar{G} = \left( \frac{1}{G} + 3te^{-\lambda t} \frac{\beta\sigma_0}{\eta\sigma_i} \right)^{-1}, \quad (17)$$

– на основе кинетического подхода:

$$\bar{G} = \left( \frac{1}{G} + 3 \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Перепишем кинетическое уравнение для одноосного деформирования в раскрытом виде:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{11}} \sigma_{11} + \ln \frac{t}{\tau_0} \frac{\alpha k T}{C} + \sigma_{11} \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0}. \quad (19)$$

После преобразования выражения (19) по аналогии с выражением для напряжений кинетической теории [12] получим:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_0 + \ln \frac{t}{\tau_0} \left( \frac{\alpha k T}{C} + \sigma_{11} \frac{t}{\eta} \right). \quad (20)$$

Учитывая, что второе слагаемое в скобках выражения (20) представляет собой напряжения, обусловленные тепловой составляющей, запишем:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{11}} [\sigma_{11} + \sigma_{11}(T)] + \sigma_{11} \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0}. \quad (21)$$

Тогда для обобщенных напряжений, обусловленных действием тепловой и механической составляющей ТСН, получим обобщенное уравнение связи деформаций и напряжений при одноосном деформировании:

$$\varepsilon_{11} = \frac{1}{E_{11}} \sigma_{11}(\sigma, T) + \sigma_{11} \frac{t}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0}, \quad (22)$$

или после преобразования:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E_{11}} \left( 1 + \frac{1}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0} t \right). \quad (23)$$

Уравнение для величины, обратной операторному модулю упругости, примет обобщенный вид:

$$\frac{1}{\bar{E}_{ii}} = \frac{1}{E_{ii}} \left( 1 + \frac{1}{\eta} \ln \frac{t}{\tau_0} t \right). \quad (24)$$

Таким образом, на основании принципа соответствия теории упругости и вязкоупругости справедливы физические соотношения между напряжениями и деформациями ползучести для реологических материалов, выраженные через операторные модули вязкоупругости  $\bar{E}$  и сдвига  $\bar{G}$ , полученные в кинетической и полуэмпирической форме (17), (18), (24):

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\sigma_{ij}}{E_{ii}}; \quad \varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{G_{ij}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3. \quad (25)$$

Полученные соотношения (11)-(25) позволяют проводить анализ ползучести полимерных конструкционных композитов при сложном напряженно-деформированном состоянии с помощью

методов теории упругости, при использовании полученных выражений для операторных модулей вязкоупругости и вязкого сдвига.

Общий алгоритм анализа ползучести полимерных композитов при сложном напряженно-деформированном состоянии представлен с помощью блок-схемы (рис.1).

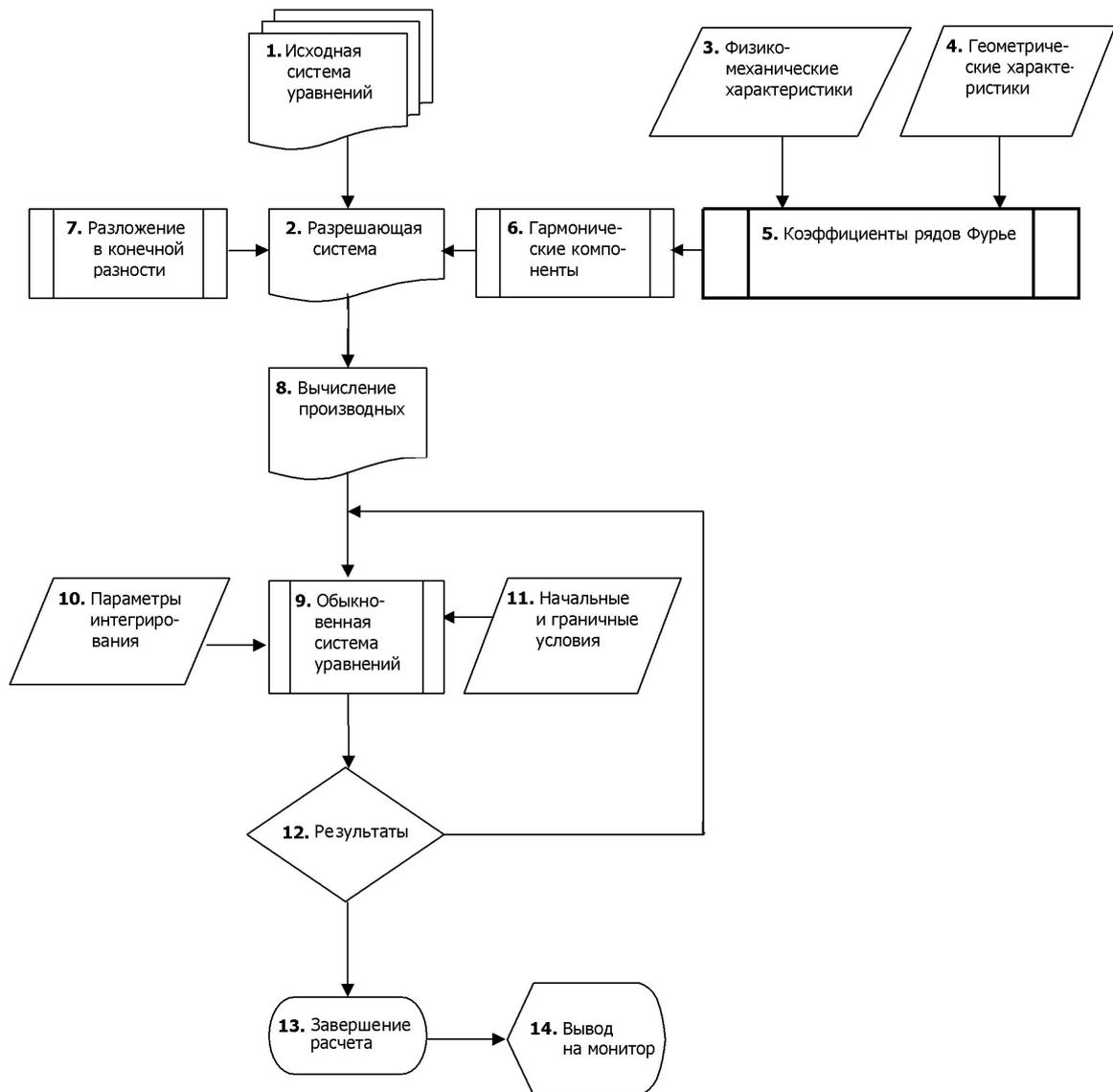


Рис.1. Блок-схема алгоритма анализа ползучести полимерных композитов при сложном напряженно-деформированном состоянии

В соответствии с этим алгоритмом на первом шаге составляется исходная система уравнений упругости для сложного напряженно-деформированного состояния, в которую входят уравнения вида (1), (2), (25). Далее, на втором шаге, в соответствии с методами [11], записывается разрешающая система уравнений относительно функций распределения напряжений по толщине, в которых выражаются условия контакта между слоями. На 3-м и 4-м шагах осуществляется ввод исходных данных о физико-механических (вязкоупругих), теплофизических и массово-геометрических характеристиках конструкции, а также исходные данные о нагрузках, выражен-

ные через функции напряжений, перемещений и температуры. Указанные исходные данные используются для разложения функций параметров нагружения и напряженно-деформированного состояния в двойные тригонометрические ряды по поверхностным координатам. На шаге 5-м определяются коэффициенты рядов Фурье. На шаге 6-м вычисляются гармонические компоненты функций разложения для Фурье-анализа. Одновременно на шаге 7-м осуществляется разложение производных по времени в конечные разности. Полученные результаты разложения функций используются для разделения переменных в разрешающей системе уравнений, полученных на втором шаге алгоритма. В результате разделения переменных и вычисления производных от простых тригонометрических функций, выполненных на шаге 8-м, приходим к системе обыкновенных дифференциальных уравнений на шаге 9-м, для решения которой, на шаге 10-м, задаются параметры расчета, определяющие число гармоник по поверхностным координатам, число точек интегрирования по толщине и дискретной ортогонализации.

Кроме этого, на шаге 11-м, осуществляется ввод данных о начальных и граничных условиях для решения краевой задачи. В результате решения задачи, на шаге 12-м, определяются искомые полные функции напряжений и перемещений путем двойного суммирования волновых функций в соответствии с методом анализа Фурье. Решение осуществляется до полного окончания суммирования по всем волновым числам. На этом алгоритм завершается (шаг 13), и результаты решения выводятся на экран монитора (шаг 14).

Проверка достоверности используемой модели показала точную сходимость результатов расчета тестового варианта для изотропной тонкостенной оболочки (рис.2, а) с результатами того же варианта по классической теории с «наложением» решения по трехмерной теории в области краевого эффекта [11] (рис.2, б).

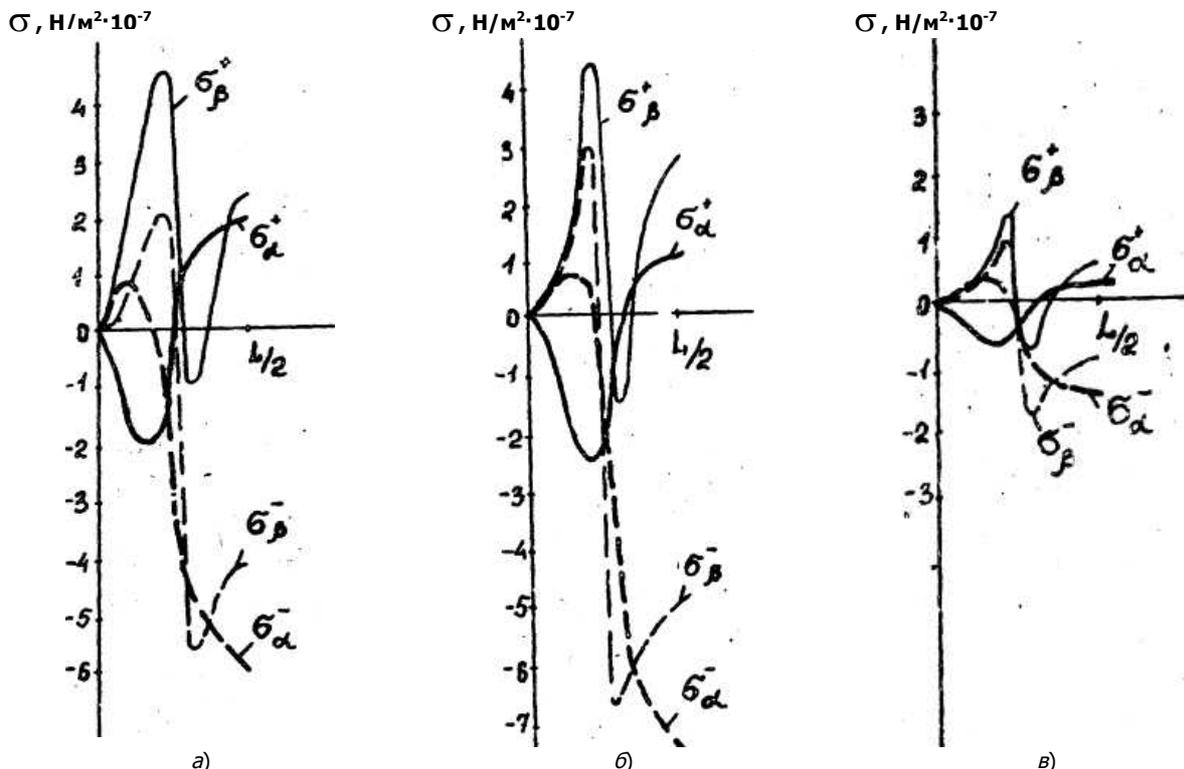


Рис.2. Распределение окружных и меридиональных напряжений по наружной и внутренней поверхности оболочечной конструкции: а – из металла АМг-6, полученное с использованием классической модели [13]; б, в – из металла АМг-6 и композитного материала СВМ + ЭДТ-10, соответственно, полученное с помощью представленной трехмерной модели

Расчет проводился для металлической оболочки из АМг-6 с размерами:  $L/R=0,5$ ,  $l_0/R=0,25$ ,  $\varphi_0=0,25L$  (рад), где  $L$ ,  $R$  – длина и радиус оболочки;  $l_0$ ,  $\varphi_0$  – линейный и угловой размеры локальной области. Результаты расчета окружных и меридиональных напряжений наружной и внутренней поверхностей оболочки представлены на рис.2, а, б.

С помощью предложенной модели были проведены исследования многослойных анизотропных оболочек из композитного материала СВМ + ЭДТ-10.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) при нагреве локальной области для рассмотренного выше варианта нагружения композитной оболочки приведены на рис.2, в.

Сравнение полученных результатов расчета показывает общее сходство картины распределения напряжений в композитных и металлических оболочках, однако, напряжения в композитной конструкции в 3-3,7 раза меньше, чем в металлической. В этом проявляется преимущество композитов перед металлами при использовании их в качестве конструкционных материалов в различных областях техники.

**Заключение.** Приведенная математическая модель, а также методы и алгоритмы ее применения позволяют прогнозировать кратковременную и длительную прочность современных и перспективных несущих конструкций из полимерных композитных материалов при многофакторном воздействии нагрузок и условий эксплуатации на основе численных методов расчета напряженно-деформированного состояния многослойных оболочек с использованием анализа Фурье.

#### **Библиографический список**

1. Критерии прочности и надежность конструкций / В.Н. Аликин [и др.]; под ред. М.И. Соколовского. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2005. – 164 с.
2. Исследование процессов массопереноса в многослойных полимерных конструкциях сложной формы / В.Н. Аликин [и др.] // Динамика и прочность машин: сб. тр. – 2001. – №3. – Пермь: ПГТУ. – С.27-33.
3. Ашкенази Е.К. Анизотропия конструкционных материалов / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
4. Баничук Н.В. Оптимизация элементов конструкций из композиционных материалов / Н.В. Баничук, Р.В. Рикардс. – М.: Машиностроение, 1988.
5. Баранов А.Н. Экспериментальное исследование критической деформации цилиндрической оболочки в условиях ползучести / А.Н. Баранов, М.А. Морозов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – №1.
6. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г.М. Бартенев. – М.: Химия, 1984. – 280 с.
7. Бахвалов Н.С. Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композиционных материалов / Н.С. Бахвалов, Г.П. Панасенко. – М.: Наука, 1984.
8. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1968. – 330 с.
9. Белозеров Л.Г. Композитные оболочки при силовых и тепловых воздействиях / Л.Г. Белозеров, В.А. Киреев. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 2003. – 388 с.
10. Гольденблат И.И. Длительная прочность в машиностроении / И.И. Гольденблат, В.Л. Бажанов, В.А. Копнов. – М.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
11. Григоренко Я.М. Решение нелинейных задач теории оболочек на ЭВМ / Я.М. Григоренко, А.П. Мукоед. – Киев: Вища школа, 1983.
12. Журков С.Н. Дилатонный механизм прочности твердых тел / С.Н. Журков // Физика прочности и пластичности. – 1986. – С.5-10.
13. Нерубайло Б.В. Локальные задачи прочности цилиндрических оболочек / Б.В. Нерубайло. – М.: Машиностроение, 1983.

14. Осяев О.Г. Испытания моделей корпусов летательных аппаратов при нагреве подвижным источником / О.Г. Осяев // Численные и аналитические методы решения задач строительной механики и теории упругости, 1995. – С.32-38.
15. Партон В.З. Динамическая механика разрушения / В.З. Партон, В.Г. Борисковский. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
16. Петров В.А. Дилатонная модель термофлуктуационного зарождения трещин / В.А. Петров // ФТТ. – 1983. – 25. – С.3124-3127.
17. Петров В.А. Тепловые флуктуации как генератор зародышевых трещин / В.А. Петров. – М.: Наука, 1986. – С.11-17.
18. Подстригач Я.С. Термоупругость тел неоднородной структуры / Я.С. Подстригач, В.А. Ломакин, Ю.М. Коляно. – М.: Наука, 1984.
19. Самарин Ю.П. Структурная модель среды для описания пластичности и ползучести при сложном напряженном состоянии / Ю.П. Самарин, В.П. Радченко, С.В. Кузьмин // Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1986. – С.233-237.
20. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Наука, 1977. – 320 с.
21. Хома И.Ю. Обобщенная теория анизотропных оболочек / И.Ю. Хома. – Киев: Наукова думка, 1985.
22. Обобщенная теория неоднородных по толщине пластин и оболочек / Л.П. Хорошун [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1983.
23. Червонный А.А. Надежность сложных систем / А.А. Червонный, В.И. Лукьяненко, В.Л. Котин. – М.: Машиностроение, 1986. – 288 с.

Материал поступил в редакцию 27.05.2011.

## **References**

1. Kriterii prochnosti i nadyozhnost` konstrukcij / V.N. Alikin [i dr.]; pod red. M.I. Sokolovskogo. – М.: Nedra-Biznescentr, 2005. – 164 s. – In Russian.
2. Issledovanie processov massoperenosa v mnogoslojny`x polimerny`x konstrukciyax slozhnoj formy` / V.N. Alikin [i dr.] // Dinamika i prochnost` mashin: sb. tr. – 2001. – #3. – Perm`: PGTU. – S.27-33. – In Russian.
3. Ashkenazi E.K. Anizotropiya konstrukcionny`x materialov / E.K. Ashkenazi, E`.V. Ganov. – L.: Mashinostroenie, 1972. – 216 s. – In Russian.
4. Banichuk N.V. Optimizaciya e`lementov konstrukcij iz kompozicionny`x materialov / N.V. Banichuk, R.V. Rikards. – М.: Mashinostroenie, 1988. – In Russian.
5. Baranov A.N. E`ksperimental`noe issledovanie kriticheskoj deformacii cilindricheskoj obolochki v usloviyax polzuchesti / A.N. Baranov, M.A. Morozov // Izv. AN SSSR. Mexanika tvyordogo tela. – 1971. – #1. – In Russian.
6. Bartenev G.M. Prochnost` i mexanizm razrusheniya polimerov / G.M. Bartenev. – М.: Ximiya, 1984. – 280 s. – In Russian.
7. Baxvalov N.S. Osrednenie processov v periodicheskix sredax. Matematicheskie zadachi mexaniki kompozicionny`x materialov / N.S. Baxvalov, G.P. Panasenko. – М.: Nauka, 1984. – In Russian.
8. Bezuxov N.I. Osnovy` teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti / N.I. Bezuxov. – М.: Vy`sshaya shkola, 1968. – 330 s. – In Russian.
9. Belozеров L.G. Kompozitny`e obolochki pri silovy`x i teplovy`x vozdejstviyax / L.G. Belozеров, V.A. Kireev. – М.: Izd-vo fiz.-mat. lit-ry`, 2003. – 388 s. – In Russian.
10. Gol`denblat I.I. Dlitel`naya prochnost` v mashinostroenii / I.I. Gol`denblat, V.L. Bazhanov, V.A. Kopnov. – М.: Mashinostroenie, 1977. – 248 s. – In Russian.
11. Grigorenko Ya.M. Reshenie nelinejny`x zadach teorii obolochek na E`VM / Ya.M. Grigorenko, A.P. Mukoed. – Киев: Vy`shha shkola, 1983. – In Russian.

12. Zhurkov S.N. Dilatony`j mexanizm prochnosti tvordy`x tel / S.N. Zhurkov // Fizika prochnosti i plastichnosti. – 1986. – S.5-10. – In Russian.

13. Nerubajlo B.V. Lokal`ny`e zadachi prochnosti cilindricheskix obolocek / B.V. Nerubajlo. – M.: Mashinostroenie, 1983. – In Russian.

14. Osyayev O.G. Ispy`taniya modelej korpusov letatel`ny`x apparatov pri nagreve podvizhny`m istochnikom / O.G. Osyayev // Chislenny`e i analiticheskie metody` resheniya zadach stroitel`noj mexaniki i teorii uprugosti, 1995. – S.32-38. – In Russian.

15. Parton V.Z. Dinamicheskaya mexanika razrusheniya / V.Z. Parton, V.G. Boriskovskij. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 264 s. – In Russian.

16. Petrov V.A. Dilatonnaya model` termoflukuacionnogo zarozhdeniya treshhin / V.A. Petrov // FTT. – 1983. – 25. – S.3124-3127. – In Russian.

17. Petrov V.A. Teplovy`e flukuacii kak generator zarody`shevy`x treshhin / V.A. Petrov. – M.: Nauka, 1986. – S.11-17. – In Russian.

18. Podstrigach Ya.S. Termouprugost` tel neodnorodnoj struktury` / Ya.S. Podstrigach, V.A. Lomakin, Yu.M. Kolyano. – M.: Nauka, 1984. – In Russian.

19. Samarin Yu.P. Strukturnaya model` srede` dlya opisaniya plastichnosti i polzuchesti pri slozhnom napryazhyonnom sostoyanii / Yu.P. Samarin, V.P. Radchenko, S.V. Kuz`min // Prochnost` materialov i e`lementov konstrukcij pri slozhnom napryazhyonnom sostoyanii. – Kiev: Naukova dumka, 1986. – S.233-237. – In Russian.

20. Samarskij A.A. Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody`. Primery` / A.A. Samarskij, A.P. Mixajlov. – M.: Nauka, 1977. – 320 s. – In Russian.

21. Xoma I.Yu. Obobshhyonnaya teoriya anizotropny`x obolocek / I.Yu. Xoma. – Kiev: Naukova dumka, 1985. – In Russian.

22. Obobshhyonnaya teoriya neodnorodny`x po tolshhine plastin i obolocek / L.P. Xoroshun [i dr.]. – Kiev: Naukova dumka, 1983. – In Russian.

23. Chervonny`j A.A. Nadyozhnost` slozhny`x sistem / A.A. Chervonny`j, V.I. Luk`yanenko, V.L. Kotin. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 288 s. – In Russian.

## **KINETIK-PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR ANALYSIS OF POLYMERIC COMPOSITE CREEP UNDER COMPLEX STRESS-STRAIN STATE**

**O.G. OSYAEV, Y.A. TATURIN, A.M. KOSTIN, A.V. ZHUKOV**  
(Rostov Military Institute of Rocket Forces)

*Kinetic and semiempirical expressions for the creep function in the physical equations of the theory of aging and the kinetic theory of strength under the complex stress-strain state, as well as for the operator viscoelasticity modulus and the operator modulus of viscous creep are got.*

**Keywords:** *kinetic-phenomenological model, strength, viscoelasticity, creep, polymeric composite.*