

На правах рукописи

Макаров Роман Юрьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ РЕОЛОГИЧЕСКОГО
ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2018

Работа выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Зотеев Владимир Евгеньевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
технический университет»,
профессор кафедры
«Прикладная математика и информатика»

Официальные оппоненты: **Бутов Александр Александрович**,
доктор физ.-мат. наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный
университет», заведующий кафедрой
«Прикладная математика»

Ермоленко Георгий Юрьевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный
университет путей сообщения», профессор
кафедры «Прикладная математика,
информатика и информационные системы»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего обра-
зования «Самарский национальный
исследовательский университет имени
академика С. П. Королева», г. Самара

Защита состоится 26 декабря 2018 г. в 10 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.217.03 в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет» по адресу: г. Самара, ул. Галактионовская, 141, корп. №6, ауд. №33.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100,
г. Самара, ул. Первомайская, 18.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим на-
правлять по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный
корпус, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.03;
тел. (846) 337-04-43, e-mail: zoteev-ve@mail.ru

Автореферат разослан _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.217.03



Зотеев В. Е.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Современное машиностроение постоянно сталкивается с проблемой повышения долговечности и увеличения ресурса установок и элементов конструкций при одновременном снижении их материалоемкости. Эти обстоятельства объективно приводят к увеличению рабочих напряжений, появлению неупругих реологических деформаций, ускорению накопления поврежденности и, как следствие, к необходимости разработки новых методов анализа напряженно-деформированного состояния. Принимая во внимание увеличение числа элементов конструкций, срок службы которых приближается к назначенному ресурсу, большой разброс механических характеристик материала (особенно для процессов ползучести и усталости), можно сделать вывод, что актуальность данных разработок лишь возрастает. Возникающая при этом проблема достоверной оценки предельного ресурса элементов конструкций (предельные значения деформаций, перемещений, напряжений) в условиях реальной эксплуатации требует неклассического подхода к её решению.

Возможным решением обозначенных задач является разработка новых методов построения обобщенных моделей деформирования и разрушения элементов конструкций в форме определяющих соотношений типа «обобщенные нагрузки – обобщенные перемещения», описывающих зависимости появления и накопления деформации от напряжения, накопления поврежденности, недопустимых деформаций, как материалов, так и элементов конструкций.

В свою очередь, построение новых математических моделей реологического деформирования является только первым этапом в реализации триады «модель – алгоритм – программа», и следующим шагом является разработка вычислительных алгоритмов для реализации предлагаемых методов математического моделирования на компьютере. К трудностям данного этапа следует отнести как недостатки существующих методов и алгоритмов, применяемых для оценки параметров моделей реологического деформирования (чувствительность к монотонности входных экспериментальных данных, медленная, либо даже отсутствующая, сходимость итерационных процедур, неопределенность выбора начальных приближений), так и трудности в разработке новых численных методов, обусловленные нелинейностью определяющих соотношений.

Таким образом, обозначенные проблемы требуют разработки и исследования новых численных методов оценки параметров процесса реологического деформирования, реализации вычислительных алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ, комплексного исследования с применением математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Для решения указанных проблем можно воспользоваться подходом, в основе которого лежат линейно-параметрические дискретные модели, описывающие в форме разностных уравнений результаты наблюдений процесса реологического деформирования. Известные соотношения между параметрами нелинейной модели реологического деформирования и коэффициентами линейно-параметрической дискретной модели позволяют при решении задачи нели-

нейного оценивания эффективно использовать известные методы линейного регрессионного анализа и статистической обработки экспериментальных данных.

Целью диссертационной работы является построение, исследование и систематизация новых линейно-параметрических дискретных моделей, в форме разностных уравнений описывающих процессы реологического деформирования материалов и элементов конструкций, разработка и исследование на их основе новых численных методов оценивания параметров моделей реологического деформирования, а также программная реализация разработанных численных методов.

Объектом исследования являются математические модели реологического деформирования элементов конструкций и конструкционных материалов, проявляющих реологические свойства при эксплуатации.

Предметом исследования являются линейно-параметрические дискретные модели, описывающие в форме разностных уравнений результаты наблюдений деформации, и численный метод определения параметров моделей реологического деформирования на основе среднеквадратичного оценивания коэффициентов разностных уравнений.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы прикладного регрессионного анализа, теории линейных разностных уравнений, параметрической оптимизации, системного анализа и компьютерного моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– построены новые линейно-параметрические дискретные математические модели, описывающие в форме разностных уравнений различные стадии реологического деформирования материалов и элементов конструкций;

– разработаны и апробированы новые численные методы определения параметров моделей реологического деформирования, отличающиеся от существующих методов применением среднеквадратичного оценивания коэффициентов разностных уравнений, описывающих результаты эксперимента, что позволяет повысить точность вычислений оценок параметров и степень адекватности моделей экспериментальным данным;

– разработан комплекс программ, реализующих разработанные алгоритмы численных методов, который может быть использован при обработке экспериментальных данных при исследовании реологической деформации.

Практическая значимость работы. Построенные линейно-параметрические дискретные модели, описывающие в форме разностных уравнений процесс реологического деформирования, а также предлагаемый численный метод оценки параметров моделей реологического деформирования и разработанный пакет прикладных программ, реализующий алгоритмы вычислений параметров моделей реологического деформирования, может быть использован при обработке результатов научно-технических экспериментов и промышленных испытаний, имеющих характерные стадии развития деградационных процессов (стадию приработки, нормальной работы, стадию старения).

Обоснованность выносимых на защиту научных положений, выводов и рекомендаций, а также достоверность полученных результатов исследований обеспечивается корректным использованием применяемого математического аппарата и вводимых допущений и гипотез; сравнением данных численного расчета с известными аналитическими методами для подтверждения точности результатов вычислений; численно-аналитическими исследованиями на основе имитационного моделирования устойчивости вычислений; численно-аналитическими исследованиями адекватности построенных математических моделей экспериментальным данным.

На защиту выносятся:

- линейно-параметрические дискретные модели, описывающие в форме разностных уравнений экспериментальные значения реологической деформации в пределах первой, второй, третьей стадий и их комбинаций;
- новые дискретные математические модели, связывающие результаты наблюдений, коэффициенты разностных уравнений и параметры моделей;
- численный метод среднеквадратичного оценивания параметров моделей реологического деформирования в пределах первой, второй, третьей стадий и их комбинаций;
- новые результаты численно-аналитических исследований эффективности разработанного численного метода определения параметров моделей реологического деформирования на основе разностных уравнений.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на Девятой всероссийской конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии» (г. Самара, 2013 г.); Международной молодежной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых» (г. Йошкар-Ола, 2013 г.); Восьмой всероссийской конференции по механике деформируемого твердого тела (г. Чебоксары, 2014 г.); Заочной международной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (г. Воронеж, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Развитие технических наук в современном мире» (г. Воронеж, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективы развития современных математических и естественных наук» (г. Воронеж, 2014 г.); Восьмой международной конференции «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (г. Новосибирск, 2015 г.); Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии ПИТ-2015» (г. Самара, 2015 г.); Десятой всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (г. Самара, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективные информационные технологии ПИТ-2017» (г. Самара, 2017 г.); на научных семинарах «Механика и прикладная математика» Самарского государственного технического университета (рук. д.ф.-м.н., профессор В.П. Радченко, 2015–2018 гг.).

Внедрение. Результаты диссертационной работы

– использованы в расчетной практике АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара;

– внедрены в опытно-конструкторскую работу специализированных отделов ООО «Специальное Конструкторско-Технологическое Бюро «Пластик», г. Сызрань;

– использованы в учебном процесса ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в лекционных курсах по дисциплинам «Численные методы», «Математическое моделирование в машиностроении», «Математические методы обработки экспериментальных данных», «Математические методы прогнозирования», а также в лабораторных, курсовых и выпускных квалификационных работах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 5 в изданиях из перечня ВАК, в Роспатенте получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Работы [1,6,9-12] выполнены самостоятельно, в работах [7], [8], [13], [14], [16] автору принадлежит совместная постановка задачи и разработка метода, в работе [15] диссертанту принадлежит совместная разработка алгоритмов, а также их программная реализация, в [2], [3], [4], [5] – совместная постановка задач, разработка метода численного решения и его исследование, анализ и систематизация результатов расчетов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемых источников и литературы из 95 наименований. Работа содержит 260 страниц основного текста, включая 9 таблиц, 84 рисунка и приложения.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определяются цели исследования, излагается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приводится структура диссертационной работы, а также сведения об апробации работы и публикациях.

В первой главе описываются известные математические модели реологического деформирования в случае одноосного напряженного состояния, в построение которых значительный вклад внесли многие ученые, в том числе Работнов Ю.Н., Качанов Л.М., Малинин Н.Н., Одинг И.А., Самарин Ю.П., Радченко В.П., Еремин Ю.А., Локощенко А.М., Шестериков С.А., Юмашева М.А., Эндрейд Е.Н. (E.N. Andrade), Гарофало Ф. и другие. Отмечается полнота математического описания деформации ползучести.

На основе анализа существующего математического описания процессов реологического деформирования сделан выбор в пользу модели, описанной в работах Самарина Ю.П. и Радченко В.П. в форме системы дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{aligned}
\varepsilon &= e + e^p + p, & \dot{e} &= \frac{\dot{\sigma}}{E}, & \dot{e}^p &= \chi S'(\sigma) \dot{\sigma}, & p &= u + v + w; \\
u(t) &= \sum_{k=1}^s u_k(t), & \dot{u}_k(t) &= \lambda_k \left[a_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right) - u_k(t) \right]; \\
v(t) &= \sum_{k=1}^s v_k(t), & \dot{v}_k &= \begin{cases} \lambda_k \left[b_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^n - v_k(t) \right], & b_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^n > v_k(t); \\ 0, & b_k \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^n \leq v_k(t); \end{cases} \\
\dot{w}(t) &= c \left(\frac{\sigma(t)}{\sigma_*} \right)^m; \tag{1}
\end{aligned}$$

$$\sigma = \sigma_0 (1 + \omega); \tag{2}$$

$$\dot{\omega} = \gamma \sigma \dot{e}^p + \alpha \sigma \dot{p}, \tag{3}$$

где ε – полная деформация, e и e^p – упругая и пластическая деформация; p – реологическая деформация; u , v , w – вязкоупругая, вязкопластическая и вязкая составляющие p ; σ_0 и σ – номинальное и истинное напряжения; E – модуль Юнга; λ_k , a_k , b_k , c , n , m , σ_* – реологические константы материала; α и γ – параметры материала, контролирующие процессы разупрочнения, ω – параметр поврежденности. Величина $\chi = 1$ при $\sigma(t) > \sigma(\tau)$, ($0 \leq \tau < t$) и $\chi = 0$, если можно указать такой момент τ , когда $\sigma(t) \leq \sigma(\tau)$. Из уравнений (1) – (3) можно получить зависимость для описания реологической деформации от времени и напряжения в пределах трех стадий разрушения в виде

$$p(t, \sigma_{0j}) = \sum_{k=1}^s c_k (1 - e^{-\lambda_k t}) \sigma_{0j}^n - \frac{1}{\sigma_{0j} m \alpha} \ln(1 - \alpha m c \sigma_{0j}^{m+1} t), \quad j = \overline{1, M}, \quad c_k = a_k + b_k. \tag{4}$$

Проведен анализ существующих подходов и методов, применяемых в задачах параметрической идентификации нелинейных моделей реологического деформирования. Отмечено, что известные методы обладают рядом недостатков. В основном эти методы используют детерминированные модели без учета случайной составляющей в результатах наблюдений, и не предусматривают применения алгоритмов на основе статистической обработки результатов вычислений (например, метод последовательного выделения экспонент). Попытки использования известных методов нелинейного оценивания (например, метод Ньютона-Гаусса, метод Левенберга-Марквардта) в задачах среднеквадратического оценивания параметров моделей реологического деформирования выявили их существенную ограниченность, связанную с проблемой выбора начальных приближений и сходимостью итерационных процедур.

Рассматривается и анализируется перспектива повышения адекватности моделей реологического деформирования и, как следствие, повышения точности вычисления их параметров, на основе подхода, предлагаемого в работах В.Е. Зотеева. Суть подхода заключается в переходе от нелинейной детерминированной математической модели реологического деформирования к линейно-параметрической дискретной модели, которая в форме разностных уравнений описывает последовательность результатов наблюдений. Построенные при этом зависимости между коэффициентами разностного уравнения и параметрами нелинейной модели позволяют свести задачу параметрической идентификации к итерационной процедуре среднеквадратичного оценивания коэффициентов линейно-параметрической дискретной модели. При этом практически решается проблема выбора начального приближения при достаточно высокой скорости сходимости итерационных процедур.

На основе результатов анализа формулируются научная проблема, цель и задачи диссертации.

Во второй главе рассматривается построение систем разностных уравнений для модели реологического деформирования на первой стадии разрушения (на примере деформации ползучести) вида

$$p(t, \sigma_0) = \sum_{k=1}^s c_k (1 - e^{-\alpha_k t}) \sigma_0^n, \quad (5)$$

где c_k , α_k , n – параметры материала, σ_0 – значения номинального напряжения, p – деформация ползучести. Разностные уравнения построены для числа экспоненциальных слагаемых s от 1 до 3; выведены соотношения, связывающие параметры модели (5) с коэффициентами разностных уравнений.

Системы разностных уравнений для модели (5) в зависимости от числа экспоненциальных слагаемых s и соотношения, связывающие параметры модели (5) с коэффициентами разностных уравнений, имеют вид:

$$s = 1: \frac{p_{0,j}}{\sigma_{0j}^n} = 0, \quad \frac{p_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \frac{p_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_1 + \lambda_2, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad j = \overline{1, M}, \quad \lambda_1 = e^{-\alpha\tau}, \quad \lambda_2 = c(1 - e^{-\alpha\tau});$$

$$s = 2: \frac{p_{0,j}}{\sigma_{0j}^n} = 0, \quad \frac{p_{1,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_4, \quad \frac{p_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_1 \frac{p_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_2 \frac{p_{k-2,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_3, \quad k = \overline{2, N-1}, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\lambda_1 = \mu_1 + \mu_2, \quad \lambda_2 = \mu_1 \mu_2, \quad \lambda_3 = c_s (\mu_1 \mu_2 - \mu_1 - \mu_2 + 1),$$

$$\lambda_4 = c_s - c_1 e^{-\alpha_1 \tau} - c_2 e^{-\alpha_2 \tau}, \quad c_s = \sum_{i=1}^2 c_i, \quad \mu_i = \exp(-\alpha_i \tau), \quad i = 1, 2;$$

$$s = 3: \frac{p_{0,j}}{\sigma_{0j}^n} = 0, \quad \frac{p_{1,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_5, \quad \frac{p_{2,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_6, \quad \frac{p_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_1 \frac{p_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_2 \frac{p_{k-2,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_3 \frac{p_{k-3,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_4,$$

$$k = \overline{3, N-1}, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\lambda_1 = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3, \quad \lambda_2 = -\mu_1 \mu_2 - \mu_1 \mu_3 - \mu_2 \mu_3, \quad \lambda_3 = \mu_1 \mu_2 \mu_3,$$

$$\lambda_4 = c_s(-\lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3 + 1), \quad \lambda_5 = c_s - c_1 e^{-\alpha_1 \tau} - c_2 e^{-\alpha_2 \tau} - c_3 e^{-\alpha_3 \tau},$$

$$\lambda_6 = c_s - c_1 e^{-2\alpha_1 \tau} - c_2 e^{-2\alpha_2 \tau} - c_3 e^{-2\alpha_3 \tau}, \quad c_s = \sum_{i=1}^3 c_i, \quad \mu_i = \exp(-\alpha_i \tau), \quad i = \overline{1,3}.$$

Построены разностные уравнения для частного случая модели реологического деформирования в пределах первых двух стадий вида

$$p(t, \sigma_0) = \sum_{k=1}^s c_k (1 - e^{-\alpha_k t}) \sigma_0^n + B \sigma_0^n t. \quad (6)$$

Разностные уравнения для модели (6) в зависимости от числа экспоненциальных слагаемых s и соотношения, связывающие параметры модели (6) с коэффициентами разностных уравнений, имеют вид:

$$s = 1: \frac{P_{0,j}}{\sigma_{0j}^n} = 0, \quad \frac{P_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \frac{P_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_1 + \lambda_2 k + \lambda_3, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\lambda_1 = e^{-\alpha \tau}, \quad \lambda_2 = B \tau (1 - e^{-\alpha \tau}), \quad \lambda_3 = c(1 - e^{-\alpha \tau}) + B \tau e^{-\alpha \tau};$$

$$s = 2: \frac{P_{0,j}}{\sigma_{0j}^n} = 0, \quad \frac{P_{1,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_5, \quad \frac{P_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_1 \frac{P_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_2 \frac{P_{k-2,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_3 k + \lambda_4, \quad k = \overline{2, N-1}, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\lambda_1 = \mu_1 + \mu_2, \quad \lambda_2 = -\mu_1 \mu_2, \quad \lambda_3 = B \tau (\mu_1 \mu_2 - \mu_2 - \mu_1 + 1),$$

$$\lambda_4 = c_s (\mu_1 \mu_2 - \mu_2 - \mu_1 + 1) - 2 \mu_1 \mu_2 B \tau, \quad \lambda_5 = c_1 (1 - e^{-\alpha_1 \tau}) + c_2 (1 - e^{-\alpha_2 \tau}),$$

$$c_s = \sum_{i=1}^2 c_i, \quad \mu_i = \exp(-\alpha_i \tau), \quad i = 1, 2;$$

$$s = 3: \frac{P_{0,j}}{\sigma_{0j}^n} = 0, \quad \frac{P_{1,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_6, \quad \frac{P_{2,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_7,$$

$$\frac{P_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \lambda_1 \frac{P_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_2 \frac{P_{k-2,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_3 \frac{P_{k-3,j}}{\sigma_{0j}^n} + \lambda_4 k + \lambda_5, \quad k = \overline{3, N-1}, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\lambda_1 = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3, \quad \lambda_2 = -\mu_1 \mu_2 - \mu_1 \mu_3 - \mu_2 \mu_3, \quad \lambda_3 = \mu_1 \mu_2 \mu_3,$$

$$\lambda_4 = B \tau (-\mu_1 \mu_2 \mu_3 + \mu_1 \mu_2 + \mu_1 \mu_3 + \mu_2 \mu_3 - \mu_1 - \mu_2 - \mu_3 + 1),$$

$$\lambda_5 = B \tau (3 \mu_1 \mu_2 \mu_3 - 2 \mu_2 \mu_3 - 2 \mu_1 \mu_3 - 2 \mu_1 \mu_2 + \mu_1 + \mu_2 + \mu_3) +$$

$$+ c_s (-\mu_1 \mu_2 \mu_3 + \mu_1 \mu_2 + \mu_1 \mu_3 + \mu_2 \mu_3 - \mu_1 - \mu_2 - \mu_3 + 1),$$

$$c_s = \sum_{i=1}^3 c_i, \quad \mu_i = \exp(-\alpha_i \tau), \quad i = \overline{1,3}.$$

Построены разностные уравнения, описывающие последовательность дискретных значений модели реологического деформирования на третьей стадии реологического деформирования, вида

$$p(t, \sigma_0) = -\frac{1}{\sigma_0 m \alpha} \ln(1 - \alpha m c \sigma_0^{m+1} t), \quad (7)$$

где c и m – константы модели; α – параметр модели, контролирующий процесс разупрочнения материала. Разностные уравнения и соотношения, связы-

вающие параметры модели (7) с коэффициентами разностных уравнений, имеют вид:

$$t_{0,j} = 0, \quad \ln \left[\exp(\lambda_1 \sigma_{0j} \Delta p_j) - 1 \right] - \ln t_{1,j} = \lambda_1 \sigma_{0j} \Delta p_j + \lambda_2 + \lambda_3 \ln \sigma_{0j},$$

$$\ln \frac{t_{k-1,j} - t_{k-2,j}}{t_{k,j} - t_{k-1,j}} = \sigma_{0j} \Delta p_j \lambda_1, \quad k = 2, 3, \dots, N_j - 1, \quad j = \overline{1, M},$$

$$\lambda_1 = m\alpha, \quad \lambda_2 = \ln(c m \alpha), \quad \lambda_3 = m + 1.$$

Построены разностные уравнения для модели реологического деформирования на третьей стадии, учитывающей степенную зависимость параметра разупрочнения α , входящего в модель (7), от напряжения, такую, что $\alpha = \alpha \sigma_0^m$. С учетом данного соотношения модель (7) принимает вид

$$p(t, \sigma_0) = -\frac{1}{m\alpha \sigma_0^{m+1}} \ln(1 - \alpha m c \sigma_0^{m+1} t). \quad (8)$$

Разностные уравнения и соотношения, связывающие параметры модели (8) с коэффициентами разностных уравнений, имеют вид

$$t_{0,j} = 0, \quad \ln \left(e^{e^{\lambda_1} \sigma_{0j}^{\lambda_2} \Delta p_j} - 1 \right) - e^{\lambda_1} \sigma_{0j}^{\lambda_2} \Delta p_j - \ln t_{1,j} = \lambda_3 \ln \sigma_{0j} + \lambda_4,$$

$$\ln \frac{t_{k-1,j} - t_{k-2,j}}{t_{k,j} - t_{k-1,j}} - \ln \Delta p_j = \lambda_1 + \lambda_2 \ln \sigma_{0j}, \quad k = 2, 3, \dots, N_j - 1, \quad j = 1, 2, \dots, M,$$

$$\lambda_1 = \ln m\alpha, \quad \lambda_2 = m_1 + 1, \quad \lambda_3 = m + m_1 + 1, \quad \lambda_4 = \ln c m \alpha.$$

Построение линейно-параметрических дискретных моделей в форме разностных уравнений являются первым этапом в разработке нового численного метода. Ключевым моментом является переход от моделей, нелинейных по параметрам, к линейно-параметрическим дискретным моделям в форме разностных уравнений, что позволяет формировать на их основе обобщенные регрессионные модели, коэффициенты которых известным образом связаны с параметрами моделей реологического деформирования.

В третьей главе рассматривается построение обобщенных регрессионных моделей, описывающих результаты наблюдений реологической деформации в пределах первой, первой и второй, третьей стадий разрушения. Построение обобщенных регрессионных моделей происходит путем ввода в разностные уравнения, построенные во второй главе, аддитивной случайной помехи:

$$y_{k,j} = p_{k,j} + \varepsilon_{k,j}, \quad k = \overline{0, N_j - 1}, \quad j = \overline{1, M}, \quad (9)$$

где $p_{k,j}$ – дискретные значения модели реологической деформации; $\varepsilon_{k,j}$ – разброс результатов эксперимента относительно принятой модели; M – количество экспериментальных кривых в серии экспериментов; N_j – количество точек результатов эксперимента в j -ой кривой. С учетом (9), разностное уравнение для модели (5) в случае одного экспоненциального слагаемого ($s = 1$)

принимает вид: $y_{0,j} = \varepsilon_{0,j}$, $\frac{y_{k,j}}{\sigma_{0j}^n} = \frac{y_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_1 + \lambda_2 + \eta_{k,j}$, $k = \overline{1, N-1}$, $j = \overline{1, M}$, где

η – вектор «невязки» в обобщенной регрессионной модели размера $\left[\sum_{j=1}^M N \times 1 \right]$,

состоящий из M векторов η_j размера $[N_j \times 1]$: $\eta_j = [\eta_{0,j}, \eta_{1,j}, \eta_{2,j}, \dots, \eta_{N-1,j}]^T$, где

$\eta_{k,j} = -\frac{\lambda_1}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k-1,j} + \frac{1}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k,j}$, $k = \overline{1, N_j - 1}$, $\eta_{0,j} = \varepsilon_{0,j}$. Построенные аналогично

разностные уравнения, описывающие результаты наблюдений, и соответствующие им «невязки» для числа экспоненциальных составляющих $s = 2$ и $s = 3$ в модели (5) имеют вид

$$s = 2: \quad \eta_{k,j} = -\frac{\lambda_1}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k-1,j} - \frac{\lambda_2}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k-2,j} + \frac{1}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k,j}, \quad k = \overline{2, N_j - 1}, \quad \eta_{0,j} = \varepsilon_{0,j},$$

$$\eta_{1,j} = \frac{1}{\sigma_{0j}^m}, \quad j = \overline{1, M};$$

$$s = 3: \quad \eta_{k,j} = -\frac{\lambda_1}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k-1,j} - \frac{\lambda_2}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k-2,j} - \frac{\lambda_3}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k-3,j} + \frac{1}{\sigma_{0j}^n} \varepsilon_{k,j}, \quad k = \overline{3, N_j - 1},$$

$$\eta_{0,j} = \varepsilon_{0,j}, \quad \eta_{1,j} = \frac{\varepsilon_{1,j}}{\sigma_{0j}^n}, \quad \eta_{2,j} = \frac{\varepsilon_{2,j}}{\sigma_{0j}^n}, \quad j = \overline{1, M}.$$

Элементы векторов «невязки» для модели (6) в зависимости от количества экспоненциальных слагаемых s описываются формулами:

$$s = 1: \quad \eta_{k,j} = -\frac{\varepsilon_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_1 + \frac{\varepsilon_{k,j}}{\sigma_{0j}^n}, \quad k = \overline{1, N-1}, \quad \eta_{0,j} = \varepsilon_{0,j}, \quad j = \overline{1, M};$$

$$s = 2: \quad \eta_{k,j} = -\frac{\varepsilon_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_1 - \frac{\varepsilon_{k-2,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_2 + \frac{\varepsilon_{k,j}}{\sigma_{0j}^n}, \quad k = \overline{2, N-1}, \quad \eta_{0,j} = \varepsilon_{0,j},$$

$$\eta_{1,j} = \varepsilon_{1,j}, \quad j = \overline{1, M};$$

$$s = 3: \quad \eta_{k,j} = -\frac{\varepsilon_{k-1,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_1 - \frac{\varepsilon_{k-2,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_2 - \frac{\varepsilon_{k-3,j}}{\sigma_{0j}^n} \lambda_3 + \frac{\varepsilon_{k,j}}{\sigma_{0j}^n}, \quad k = \overline{3, N-1}, \quad \eta_{0,j} = \varepsilon_{0,j},$$

$$\eta_{1,j} = \varepsilon_{1,j}, \quad \eta_{2,j} = \varepsilon_{2,j}, \quad j = \overline{1, M}.$$

На основе построения обобщенных регрессионных моделей предлагаются численные методы, которые включают следующие основные этапы.

1. Формирование выборки результатов наблюдений. В силу того, что при построении разностных уравнений используется равномерная дискретизация кривых ползучести либо по времени t для первой и второй стадий разрушения, либо по деформации p для третьей стадии разрушения, при формировании выборки $y_{k,j}$, $k = \overline{0, N_j - 1}$, $j = \overline{1, M}$, в ряде случаев требуется предварительное

сглаживание или интерполяция неравномерных значений результатов наблюдений, полученных в ходе эксперимента.

2. На основе построенных линейно-параметрических дискретных моделей реологического деформирования в форме разностных уравнений формирование элементов обобщенной регрессионной модели $b = F\lambda + \eta$, использующей результаты наблюдений.

3. Среднеквадратическое оценивание коэффициентов обобщенной регрессионной модели на основе минимизации величины отклонения модели реологического деформирования от результатов наблюдений по всей совокупности

экспериментальных кривых: $\|y - \hat{y}\|^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{N_j} (y_{k,j} - \hat{y}_{k,j})^2 \rightarrow \min$, где M – количество кривых реологической деформации в серии экспериментов; N_j – количество точек эксперимента для j – кривой.

4. Вычисление оценок параметров моделей реологического деформирования на основе полученных при построении разностных уравнений соотношений между коэффициентами обобщенной регрессионной модели и параметрами нелинейных моделей реологического деформирования.

5. Оценка погрешности результатов вычисления. Описана методика оценивания погрешности результатов вычисления параметров моделей реологического деформирования и построения доверительных интервалов. Приведены формулы, описывающие матрицы дисперсий-ковариаций для оценок регрессионных коэффициентов и оценок параметров моделей реологического деформирования.

После описания этапов численного метода разрабатывается и исследуется итерационная процедура среднеквадратичного оценивания коэффициентов обобщенной регрессионной модели вида

$$\begin{cases} b = F\lambda + \eta, \\ \eta = P_\lambda \varepsilon, \end{cases} \quad (10)$$

где b – свободный вектор; F – матрица регрессоров; P_λ – матрица линейного преобразования случайного возмущения, ε – вектор естественного разброса данных в результатах эксперимента, η – вектор «невязки» обобщенной регрессионной модели.

Предложены различные алгоритмы среднеквадратичного оценивания, в частности, на основе формирования и решения нормальной системы уравнений:

$$(F^T + B_\lambda D_p^T) \Omega_\lambda^{-1} F \hat{\lambda} = (F^T + B_\lambda D_p^T) \Omega_\lambda^{-1} b,$$

и на основе расширенной матрицы:

$$\left[\begin{array}{c|c} E & F \\ \hline (F + D_p B_\lambda)^T \Omega_\lambda^{-1} & \Theta \end{array} \right] \begin{bmatrix} \eta \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix},$$

где B_λ – блочная диагональная матрица размера $[nN \times n]$ с матрицами-столбцами $P_\lambda^{-1}(b - F\lambda)$ по диагонали; $D_p = \begin{bmatrix} \frac{dP_\lambda}{d\lambda_1} & \frac{dP_\lambda}{d\lambda_2} & \frac{dP_\lambda}{d\lambda_3} & \dots & \frac{dP_\lambda}{d\lambda_n} \end{bmatrix}$ – блочная матрица-строка размера $[N \times nN]$, $\Omega_\lambda = P_\lambda P_\lambda^T$; N – количество строк в матрице регрессоров F , n – количество коэффициентов в обобщенной регрессионной модели.

Итерационная процедура среднеквадратичного оценивания вектора λ в регрессионных моделях вида (10) описывается уравнением вида:

$$\hat{\lambda}^{(i+1)} = \left[\left(F^T + B_{\hat{\lambda}^{(i)}} D_p^T \right) \Omega_{\hat{\lambda}^{(i)}}^{-1} F \right]^{-1} \left(F^T + B_{\hat{\lambda}^{(i)}} D_p^T \right) \Omega_{\hat{\lambda}^{(i)}}^{-1} b, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

где начальное приближение $\hat{\lambda}^{(0)}$ вектора оценок коэффициентов разностного уравнения может быть найдено из условия минимизации «невязки»:

$$\hat{\lambda}^{(0)} = (F^T F)^{-1} F^T b.$$

Представлены результаты численно-аналитических исследований помехоустойчивости алгоритмов вычислений на основе итерационной процедуры уточнения среднеквадратичных оценок коэффициентов разностного уравнения и погрешности вычисления параметров моделей реологического деформирования. Исследования проводились на основе имитационного моделирования с использованием комплекса программ на персональном компьютере. Целью исследований являлся анализ зависимости устойчивости вычисления и погрешности оценок коэффициентов разностного уравнения и параметров моделей реологического деформирования от величины периода дискретизации τ и мощности случайной помехи в результатах наблюдений. Моделировались выборки результатов эксперимента для различных моделей реологического деформирования в условиях первой, второй и третьей стадиях ползучести. В качестве экспериментальной оценки погрешности использовался второй центральный момент, включающий дисперсию и квадрат смещения оценки. Результаты исследований свидетельствуют о высокой помехозащищенности разработанного численного метода определения параметров моделей реологического деформирования.

В четвертой главе приводятся результаты апробации разработанных алгоритмов численного метода при оценки параметров моделей реологического деформирования для различных материалов.

По результатам промышленного эксперимента строилась модель ползучести поливинилхлоридного пластиката. Были обработаны экспериментальные диаграммы ползучести поливинилхлоридного пластиката, полученные при исследовании трубчатых образцов длиной 1000 мм и сечением 1.2 мм² при температуре $T = 20^\circ C$ и пяти различных значениях напряжений $\sigma_0 = \{4.66; 6.29; 8.75; 10.38; 12.02\}$ МПа. На основе разработанного численного метода была построена модель вида

$$\hat{p}(t, \sigma_{0j}) = [0.0011(1 - e^{-0.28t}) + 0.0018(1 - e^{-8.8t})] \sigma_{0j}^{1.31}. \quad (12)$$

Экспериментальные значения деформации ползучести, а также значения, вычисленные на основе модели (12), представлены на рис. 1.

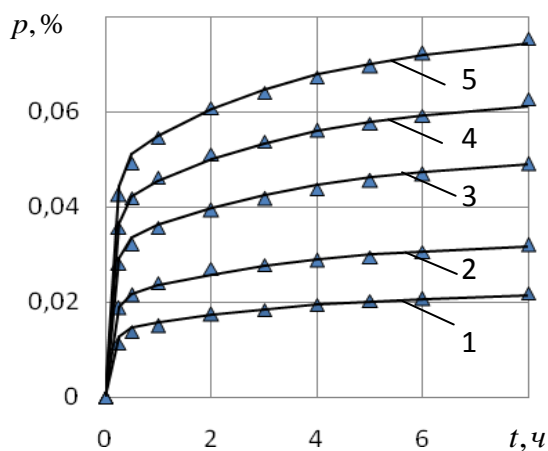


Рис.1. Экспериментальные диаграммы ползучести поливинилхлоридного пластика (треугольные маркеры) и расчетные значения (сплошные линии):
 1 – $\sigma_0 = 4.66$ МПа, 2 – $\sigma_0 = 6.29$ МПа,
 3 – $\sigma_0 = 8.75$ МПа, 4 – $\sigma_0 = 10.38$ МПа,
 5 – $\sigma_0 = 12.02$ МПа

Нормированная остаточная сумма квадратов по всей совокупности диаграмм ползучести составила 1.77%, что свидетельствует о высокой точности результатов вычислений. Коэффициент детерминации равен $R^2 = 0.998$, что свидетельствует о высокой степени адекватности построенной модели данным эксперимента.

Проведен сравнительный анализ разработанного численного метода с известным методом последовательного выделения экспонент при обработке экспериментальных диаграмм ползучести поливинилхлоридного пластика, рассмотренных в параграфе 4.1. Установлено, что модель, параметры которой получены с помощью разработанного численного метода, точнее описывает экспериментальные данные, при этом количество параметров в ней меньше, чем количество параметров, полученных известным методом последовательного выделения экспонент.

Разработанный численный метод был применен при обработке экспериментальных диаграмм ползучести алюминиевого сплава Д16АТ, полученных при различных значениях номинального напряжения $\sigma_0 = \{245.17; 284.39; 304\}$ МПа и температуре 150°C. На основе разработанного численного метода была построена модель вида

$$\hat{p}(t, \sigma_{0j}) = [7.16 \cdot 10^{-17} (1 - e^{-0.32t}) + 1.97 \cdot 10^{-18}] \sigma_{0j}^{6.26}. \quad (13)$$

Экспериментальные значения деформации ползучести алюминиевого сплава Д16АТ, а также значения, полученные на основе модели (13) представлены на рис. 2. По совокупности всех диаграмм нормированная остаточная сумма квадратов в относительных единицах равна 7.2%. Коэффициент детерминации R^2 , который косвенно может служить оценкой адекватности построенной модели экспериментальным данным, по совокупности всех диаграмм ползучести, равен $R^2 = 0.981$, что свидетельствует о высокой степени адекватности построенной модели данным эксперимента.

Приведены результаты апробации разработанного численного метода при обработке экспериментальных диаграмм ползучести сплава Д16Т (пруток диа-

метром 40 мм), полученных при температуре 250°C и значениях номинального напряжения $\sigma_0 = \{98.07; 88.26\}$ МПа и $\sigma_0 = \{78.45; 68.65\}$ МПа. На основе разработанного численного метода была построена модель вида

$$\hat{p}(t, \sigma_{0j}) = -\frac{1}{0.87\sigma_{0j}} \ln(1 - 4.45 \cdot 10^{-14} \sigma_{0j}^{5.7} t). \quad (14)$$

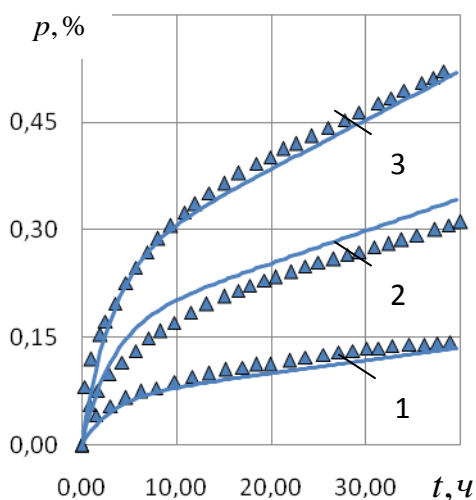


Рис.2. Экспериментальные диаграммы ползучести алюминиевого сплава Д16АТ (точки) и расчетные значения деформации ползучести:
1 – $\sigma_0 = 245.17$ МПа, 2 – $\sigma_0 = 284.39$ МПа, 3 – $\sigma_0 = 304$ МПа

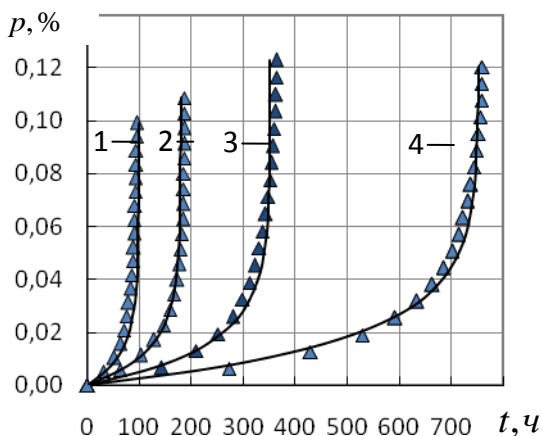


Рис.3. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) значения деформации ползучести сплава Д16Т при $T = 250^\circ\text{C}$:
1 – $\sigma_0 = 98.1$ МПа, 2 – $\sigma_0 = 88.3$ МПа, 3 – $\sigma_0 = 78.5$ МПа, 4 – $\sigma_0 = 68.7$ МПа

Экспериментальные диаграммы ползучести сплава Д16Т, а также результаты вычислений на основе полученной модели (14) представлены на рис. 3.

По совокупности всех кривых нормированная остаточная сумма квадратов в относительных единицах равна 2.6%. Коэффициент детерминации R^2 по совокупности всех диаграмм ползучести, равен $R^2 = 0.98$, что свидетельствует о высокой степени адекватности построенной модели (14) данным эксперимента.

Приведены результаты апробации разработанного численного метода при обработке экспериментальных диаграмм ползучести сплава Д16Т, рассмотренных в параграфе 4.4, при определении параметров модели ползучести, отличающейся от модели (14) вводом дополнительного параметра, учитывающим зависимость параметра разупрочнения α от напряжения. На основе разработанного численного метода была построена модель, для которой нормированная остаточная сумма квадратов в относительных единицах составила величину 2.96%. На основании этого можно сделать вывод, что усложнение модели третьей стадии ползучести за счет ввода дополнительного параметра не целесообразно, так как существенно не влияет на адекватность модели результатам эксперимента.

Приведены результаты апробации разработанного численного метода при обработке экспериментальных диаграмм ползучести стали 15Х2МФА, полученных при температуре 550°C и значениях напряжения

$\sigma_0 = \{350; 360; 370\}$ МПа. На основе разработанного численного метода была построена модель вида

$$\hat{p}(t, \sigma_{0j}) = \left[5.24 \cdot 10^{-32} (1 - e^{-0.141t}) \right] \sigma_{0j}^{12.2} - \frac{1}{2.52 \cdot 10^{-3} \sigma_{0j}} \ln(1 - 4.49 \cdot 10^{-36} \sigma_{0j}^{12.9} t). \quad (15)$$

Экспериментальные диаграммы ползучести стали 15Х2МФА, а также результаты вычислений на основе полученной модели (15) представлены на рис. 4.

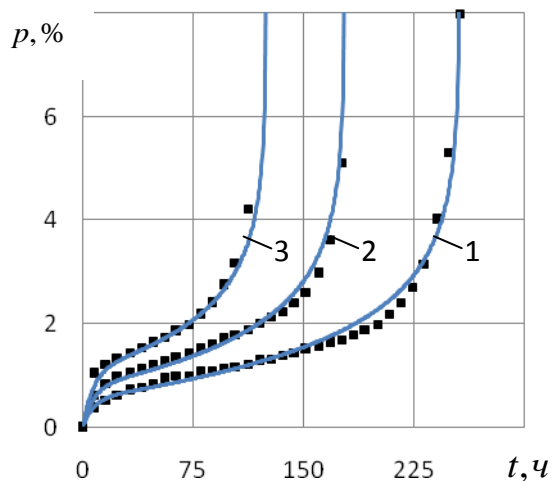


Рис.4. Экспериментальные (значки) и расчетные (сплошные линии) значения деформации ползучести стали 15Х2МФА ($T=550^\circ\text{C}$):
1 – $\sigma_0 = 350$ МПа, 2 – $\sigma_0 = 360$ МПа,
3 – $\sigma_0 = 370$ МПа

Анализ данных, представленных на рис. 4, свидетельствует об удовлетворительной коррелированности результатов расчета и экспериментальных данных.

Проведен сравнительный анализ разработанного в диссертации численного метода на основе разностных уравнений и метода Левенберга-Марквардта. Установлено, что при обработке экспериментальных данных ползучести на первой стадии и на первой и второй стадиях оба метода позволяют строить модели реологического деформирования по результатам эксперимента с одинаковой точностью. Однако при использовании метода Левенберга-Марквардта возникает проблема выбора начального приближения оценок параметров моделей. При обработке экспериментальных данных

и построении модели ползучести на третьей стадии преимущество разработанного численного метода очевидно и существенно.

Приведены результаты апробации разработанного численного метода применительно к другим процессам реологического деформирования, а именно, к оценке параметров зависимости J -интеграла, характеризующего скорость высвобождения энергии в вершине трещины от приложенной нагрузки P и относительной длины трещины $\frac{l}{W}$, где l – длина трещины, мм, W – ширина образца, мм, для сплава МА2-1. В результате применения разработанного численного метода построена математическая модель, описывающая экспериментальную зависимость J -интеграла для сплава МА2-1, вида

$$\hat{J}\left(P, \frac{l}{W}\right) = -\frac{1}{0.559 \frac{l}{W}} \ln \left[1 - 4.889 \cdot 10^{-3} \left(\frac{l}{W} \right)^{1.42} P \right]. \quad (16)$$

На рис. 5 представлены экспериментальные значения зависимости J -интеграла, а также результаты вычислений, полученные на основе модели (16). Коэффициент детерминации R^2 по совокупности всех экспериментальных за-

висимостей равен $R^2 = 0.96$, что свидетельствует о высокой степени адекватности построенной модели (16) данным эксперимента.

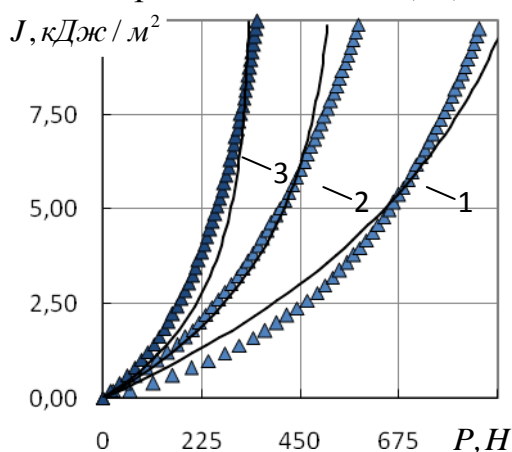


Рис. 5. Экспериментальная зависимость J -интеграла для сплава МА2-1 (точки) и расчетные (сплошные линии) значения: $1 - \frac{l}{W} = 0.3$,
 $2 - \frac{l}{W} = 0.5$, $3 - \frac{l}{W} = 0.7$

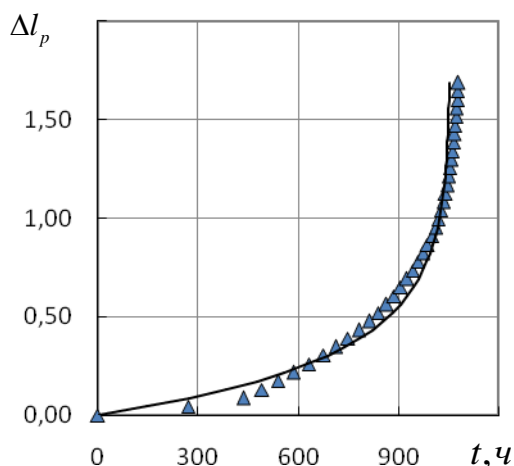


Рис. 6. Экспериментальные данные по удлинению трещины для плоского образца из стали 316L при температуре $T=600^\circ\text{C}$ (точки) и расчетные по модели значения (сплошные линии)

основные этапы алгоритма вычислений на основе разработанного численного метода; представлена блок-схемы алгоритма. Алгоритмы разработанного численного метода реализованы в виде комплекса программ под управлением операционной системы Windows. Приведено описание основных элементов и интерфейса программного обеспечения, системы диалоговых и информационных окон. Разработанное программное обеспечение зарегистрировано в Роспатенте,

Другим примером реологической деформации является удлинение трещины при ползучести Δl_p при постоянной растягивающей нагрузке q_0 . Математическая модель, описывающая зависимость удлинения трещины от нагрузки q_0 имеет вид, подобный (7):

$$\Delta l_p(t, q_0) = -\frac{1}{q_0 m \alpha} \ln(1 - \alpha m c q_0^{m+1} t). \quad (17)$$

Использованы результаты эксперимента в форме кривой по раскрытию трещины для плоских образцов из стали 316L при температуре $T=600^\circ\text{C}$.

На основе разработанного численного метода была построена модель вида

$$\hat{\Delta l}_p(t) = -\frac{1}{3.484} \ln(1 - 9.48 \cdot 10^{-4} t). \quad (18)$$

Нормированная остаточная сумма квадратов для экспериментальных данных по удлинению трещины в соответствии с моделью (18) составила 4.9%. Коэффициент детерминации равен $R^2 = 0.97$, что свидетельствует о хорошей адекватности построенной модели (18) данным эксперимента. Экспериментальные данные и результаты расчета по модели (18) изображены на рисунке 6.

Глава 5 посвящена разработке комплекса программ для определения параметров реологического деформирования на основе разностных уравнений. Описываются

свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016661735 от 19.10.2016 г.

В заключении перечислены основные научные результаты, полученные в диссертационной работе.

1. Построены и систематизированы системы разностных уравнений и на их основе обобщенные регрессионные модели, описывающие результаты наблюдений реологической деформации на первой, второй и третьей стадиях и их комбинациях; получены соотношения, связывающие коэффициенты обобщенных регрессионных моделей с параметрами нелинейных моделей реологического деформирования.

2. Разработан новый численный метод определения параметров моделей реологического деформирования на основе итерационной процедуры среднеквадратичного оценивания коэффициентов обобщенной регрессионной модели; описаны основные этапы разработанного численного метода.

3. Разработана методика оценки погрешности вычисления параметров моделей реологического деформирования на основе разностных уравнений.

4. Проведены численно-аналитические исследования эффективности разработанного численного метода определения параметров моделей реологического деформирования; проведен сравнительный анализ разработанного численного метода с известными методами, применяемыми при параметрической идентификации моделей реологического деформирования.

5. Проведена апробация и оценка адекватности результатов расчета по построенным математическим моделям на основе разработанных численных методов оценки параметров моделей реологического деформирования, описывающих первую стадию (поливинилхлоридный пластикат, $T=20^{\circ}\text{C}$), первую и вторую стадии (сплав Д16АТ, $T=250^{\circ}\text{C}$), третью стадию (сплав Д16Т, $T=150^{\circ}\text{C}$) и все три стадии (сталь 15Х2МФА, $T=550^{\circ}\text{C}$) ползучести данным эксперимента; представлены результаты апробации разработанных численных методов при определении параметров модели экспериментальной зависимости J -интеграла (сплав МА2-1) от геометрических и силовых параметров плоских образцов с трещинами и модели зависимости раскрытия трещины вследствие ползучести (плоский образец из стали 316L, $T=600^{\circ}\text{C}$); установлено соответствие расчетных и экспериментальных данных.

6. Разработано программное обеспечение под управлением операционной системы Windows, реализующее алгоритмы предлагаемого численного метода определения параметров моделей реологического деформирования, которое может быть использовано при обработке экспериментальных данных реологической деформации (деформации ползучести, раскрытии трещин, оценке энергетического состояния материала в области вершины трещины при использовании J -интеграла).

Список основных публикаций в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. Макаров Р. Ю. Численный метод определения параметров кривой ползучести на основе закона Содерберга // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). — 2015. — Т. 14, 2. — С. 113-117.
2. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Численный метод определения параметров модели ползучести разупрочняющегося материала // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-Математические науки. — 2016. — Т. 20, 2. — С. 328-341.
3. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Численный метод оценки параметров деформации ползучести при степенной зависимости параметра разупрочнения от напряжения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2016. — Т. 3, 51. — С. 18-25.
4. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Численный метод определения параметров модели ползучести в пределах первых двух стадий // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2017. — Т. 16, № 2. — С. 145-156.
5. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Численный метод определения параметров первой стадии деформации ползучести // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2017. — Т. 56, № 4. — С. 40-48.

В других изданиях:

6. Макаров Р. Ю. О численном методе определения параметров кривой ползучести на основе разностных уравнений // Перспективные информационные технологии (ПИТ 2013): труды Международной научно-технической конференции. — Самара, 2013. — Т. 2. — С. 62-67.
7. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Определение параметров кривой ползучести на основе разностных уравнений // Математическое моделирование и краевые задачи/ Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием. — Самара, 2013. — Т. 2. — С. 103-107.
8. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Параметрическая идентификация кривой ползучести на основе разностных уравнений // VIII Всероссийская конференция по механике деформируемого твердого тела : сборник трудов конференции. — Чебоксары, 2014. — С. 168-169.
9. Макаров Р. Ю. Идентификация параметров модели ползучести в случае отсутствия первой стадии ползучести // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. Сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. — Воронеж, 2014. — Т. 2. — С. 175-180.
10. Макаров Р. Ю. Идентификация параметров модели ползучести на основе закона Фройдентала // Развитие технических наук в современном мире / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. — Воронеж, 2014. — С. 12-14.

11. Макаров Р. Ю. Идентификация параметров модели ползучести на основе стохастических разностных уравнений // Перспективы развития современных математических и естественных наук. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. — Воронеж, 2014. — С. 13-15.
12. Макаров Р. Ю. Об аппроксимации кривых ползучести на основе разностных уравнений // Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике. Тезисы докладов. — Новосибирск, 2015. — С. 225-226.
13. Зотеев В.Е., Макаров Р.Ю. Аппроксимация кривых ползучести на основе разностных уравнений// Перспективные информационные технологии (ПИТ-2015): труды Международной научно-технической конференции/ под ред. С. А. Прохорова. Том 2.— Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2015. — 388 С. — С. 302-305.
14. Зотеев В. Е., Макаров Р. Ю. Численный метод нелинейного оценивания в задаче определения параметров деформации ползучести // Труды десятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». — Самара, 2016. — Т. 2. — С. 108-116.
15. Зотеев В.Е., Макаров Р.Ю. Программа расчета параметров моделей ползучести на основе разностных уравнений. Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем» от 22.11.2016.
16. Зотеев В.Е., Макаров Р.Ю. Построение линейной обобщенной регрессионной модели для третьей стадии ползучести// Перспективные информационные технологии (ПИТ-2017): труды Международной научно-технической конференции/ под ред. С. А. Прохорова. — Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2017. — 1216 С. — С. 898-900.

Заказ № 637 Формат 60x84 1/16 Уч. Изд. л. 1,00 Тираж 110 экз.

Отпечатано в типографии Самарского государственного
технического университета

443100, Самара, Молодогвардейская, 244, корпус 8

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета

Д 212.217.03

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол №11 от 22.10.2018 г.)