

УДК 539.376

МЕТОД РАСЧЕТА ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА

Бутина Т.А.

кандидат физико-математических наук, доцент

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана

(национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Дубровин В.М.

кандидат технических наук, доцент

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана

(национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Полякова Н.С.

кандидат физико-математических наук, доцент

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.Баумана

(национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Аннотация

Конструкция при длительном нагружении в процессе эксплуатации подвержена явлению ползучести, которая может влиять на её работоспособность. Это влияние зависит от уровня нагрузки, длительности нагружения, условий эксплуатации, конструктивных особенностей, вида материала. Все эти факторы учитываются при проведении испытаний, позволяющих получить кривые ползучести для конкретного материала и различных внешних условий, соответствующих условиям эксплуатации конструкции. Эти кривые позволяют построить математическую модель упруго-пластического деформирования материала. Предложенная в работе модель основана на анализе различных гипотез процесса ползучести материала. В том числе рассматривались:

- гипотеза течения, в которой основным фактором, определяющим скорость ползучести, является время пребывания под нагрузкой при данной температуре;
- гипотеза упрочнения, в которой основным фактором, определяющим скорость деформации ползучести, является деформация, вызванная наличием действующих нагрузок;
- гипотеза относительной долговечности, являющаяся сочетанием гипотезы течения и гипотезы упрочнения.

Такой анализ позволяет оценить как величину и скорость деформации ползучести, так и влияние деформации ползучести на напряженно-деформированное состояние материала. В качестве примера использования предложенного метода рассмотрена цилиндрическая оболочка при осесимметричном нагружении.

Ключевые слова: конструкция, ползучесть, деформация, кривые ползучести, модель упруго-пластической деформации, закон деформирования материала.

METHOD FOR CALCULATING THE CREEP STRAIN OF A MATERIAL

Butina T.A.

Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Dubrovin V.M.

Candidate of Technical Sciences, associate professor

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Polyakova N.S.

Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Annotation

The structure under prolonged loading during operation is subject to the phenomenon of creep, which can affect its performance. This effect depends on the load level, duration of loading, operating conditions, design features, and type of material. All these factors are taken into account when testing to obtain creep curves for a specific material and various external conditions that correspond to the operating conditions of the structure. These curves allow us to construct a mathematical model of elastic-plastic deformation of the material. The model proposed in this paper is based on the analysis of various hypotheses of the material creep process. In particular, we considered:

- the flow hypothesis, in which the main factor determining the creep rate is the time spent under load at a given temperature;
- the hardening hypothesis, in which the main factor determining the creep strain rate is the strain caused by the presence of active loads;
- the relative durability hypothesis, which is a combination of the flow hypothesis and the hardening hypothesis.

This analysis allows us to estimate both the magnitude and rate of creep deformation, and the effect of creep deformation on the stress-strain state of the material. As an example of using the proposed method, a cylindrical shell under axisymmetric loading is considered.

Keywords: construction, creep, deformation, creep curves, elastic-plastic deformation model, material deformation law.

Введение

Все кривые деформирования при ползучести получают, как правило в опытах не растяжение образцов при фиксированных напряжениях и температуре. Результаты испытаний на ползучесть представляются в виде так называемых кривых ползучести, то есть кривых зависимости полной деформации от времени [8; 11]. Меняя температуру, можно для каждого фиксированного значения температуры получить серию таких кривых. При использовании их в теоретических расчетах необходимо применять гипотезы течения, упрочнения, старения и т.д. [1; 14].

Методика расчета

Пусть в промежутке времени от 0 до t_1 действовало напряжение σ_1 , тогда в каждый момент времени от 0 до t_1 , можно найти скорость ползучести (рис.1). Если в момент времени t_1 напряжение станет равным σ_2 , то не ясно, как далее искать скорость ползучести, потому что кривая для напряжения σ_2 получена при условии, что весь промежуток времени от 0 до t_1 действовало напряжение σ_2 . Однако, эксперименты показывают, что история изменения напряженно-деформированного состояния существенно влияет на скорость ползучести.

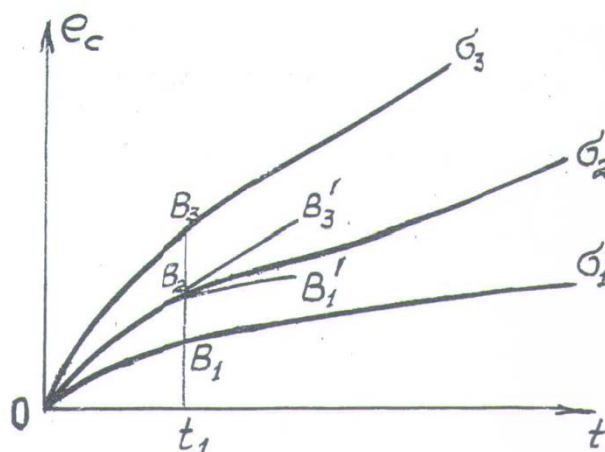


Рис.1 – Изменение деформации ползучести от времени (гипотеза течения) [3]

При использовании гипотезы течения основным фактором, определяющим скорость ползучести, является время пребывания под нагрузкой при данной температуре, независимо от истории изменения напряжений [3].

Если, например, напряжение σ_2 действует в течение t_1 (рис.1), то кривой начальной ползучести является кривая OB_2 . Затем при увеличении напряжения в точке B_2 от σ_2 до σ_3 скорость ползучести увеличится и станет равной скорости ползучести в точке B_3 на кривой σ_3 , так что дальнейшее изменение деформации ползучести пойдет по линии $B_2B'_3$. При уменьшении напряжения от σ_2 до σ_1 скорость ползучести примет значение, соответствующее точке B_1 на кривой σ_1 и пойдет по кривой $B_2B'_1$. Совершенно аналогично производится перерасчет скорости ползучести при изменении температуры. Для внутренних точек σ и T используется интерполяция.

По гипотезе упрочнения предполагается (рис.2), что главным фактором, определяющим скорость ползучести, является деформация, независимо от истории изменения напряжения, вызывающего соответствующую деформацию. Следовательно, в процессе действия ступенчато изменяющегося напряжения от σ_2 до σ_1 соответствующая скорость ползучести в точке B_2 при новом уровне напряжений σ_1 (или σ_3) будет равна скорости ползучести в точке B_1 (или B_3). Точка B_1 (или B_3) получена как точка пересечения горизонтальной линии, проходящей через точку B_2 (постоянная деформация), с кривой σ_1 (или σ_3).

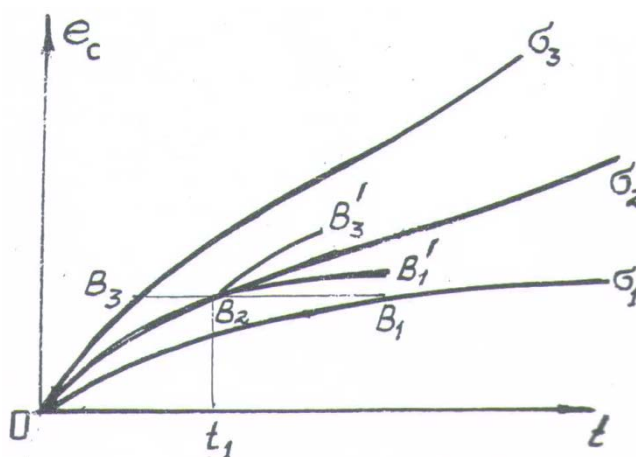


Рис.2 – Изменение деформации ползучести от времени (гипотеза упрочнения) [3]

По гипотезе течения кривые ползучести можно перестроить в кривые зависимости скорости ползучести от времени, а по гипотезе упрочнения - от накопленной деформации ползучести. Скорость ползучести определяется их полученных кривых по напряжению, температуре, и времени (или накопленной деформации ползучести).

Гипотеза относительной долговечности является сочетанием гипотезы течения и гипотезы упрочнения (рис.3). Если напряжение σ_2 меняется в точке B_2 до значения σ_1 (или σ_3), то скорость ползучести в точке B_2 принимается равной скорости ползучести в точке B_1 (или B_3), выбранной из условия, что время, соответствующее достижению точки B_1 (или B_3) составляет ту же часть общей долговечности до разрушения при постоянном напряжении σ_1 (или σ_3), что и время, соответствующее точке B_2 при постоянном напряжении σ_2 . Например, если время, соответствующее точке B_2 , составляет $1/4$ полного времени испытания при постоянном напряжении σ_2 , то точке B_1 (или B_3) соответствует время, составляющее $1/4$ долговечности при напряжении σ_1 (или σ_3), то есть

$$\frac{t_1}{t_{1n}} = \frac{t_2}{t_{2n}} = \frac{t_3}{t_{3n}} = \frac{1}{4}.$$

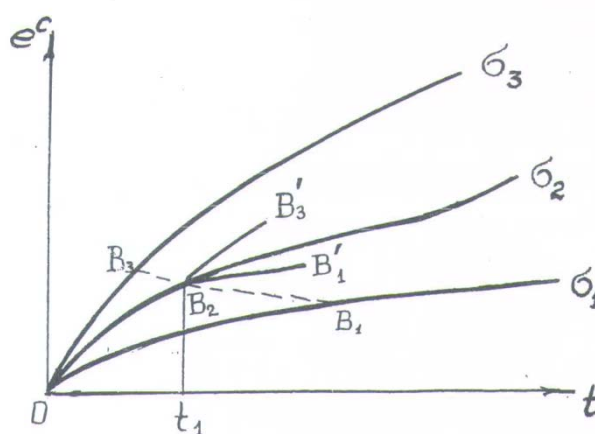


Рис.3 – Изменение деформации ползучести от времени (гипотезы относительной долговечности) [4]

При сложном напряженном состоянии скорости деформаций ползучести определяются по формуле [4]

$$\dot{e}_{ij}^c = \frac{3 S_{ij}}{2 \sigma_u} \dot{e}_u^c \quad (1)$$

где σ_u и \dot{e}_u^c - интенсивности напряжений и скоростей деформаций ползучести, а S_{ij} -девиатор напряжений. При этом $\dot{e}_u^c = \dot{e}_0^c$, где \dot{e}_0^c - скорость деформации ползучести при одноосном растяжении и может быть получена из кривых ползучести (рис.1,2,3) с использованием гипотез течения, упрочнения или относительной долговечности, как было описано выше [5].

Приращение деформаций ползучести за бесконечно малый промежуток времени dt определяется соотношением [12]

$$de_{ij}^c = \dot{e}_{ij}^c dt,$$

а деформации в некоторый момент t

$$e_{ij} = \int_0^t \dot{e}_{ij}^c dt$$

Полагая, что за малый промежуток времени Δt напряжения и скорости деформаций ползучести не меняются и используя (1) можно записать

$$\Delta e_{ij}^c = \dot{e}_{ij}^c \Delta t = \frac{3 S_{ij}}{2 \sigma_u} \dot{e}_u^c \Delta t = \frac{3 S_{ij}}{2 \sigma_u} \Delta e_u^c \quad (2)$$

Приращение Δe_u^c можно также получать непосредственно по кривым ползучести. Если, например, от 0 до t_1 действовало напряжение σ_2 (рис.1,2,3), то приращения деформации ползучести следует определять по кривой AB_2 . Если при $t = t_1$ напряжение скачком меняется до значения σ_1 (или σ_3), то приращения деформации ползучести следует определять по кривой σ_1 (или σ_3) от точки B_1 (или B_3) и далее.

При изменяющемся на шаге Δt напряженно-деформированном состоянии для нахождения приращений деформаций ползучести вместо (2) применяется формула, использующая скорости ползучести в начале шага и в конце, причем, для уточнения скорости ползучести в конце шага используются итерации.

Если кривые ползучести (рис.1,2,3) заменить прямыми, то скорость ползучести $\dot{\epsilon}_0^c$ будет зависеть только от напряжения и температуры. Это случай установившейся ползучести. Теория установившейся ползучести позволяет находить предельное распределение напряжений и скоростей деформаций при длительном действии постоянных нагрузок как при равномерном, так и при неравномерном стационарном температурном поле, когда начальное перераспределение напряжений в связи с ползучестью практически завершилось [10]. Эта же теория удовлетворительно описывает кратковременную ползучесть материалов при больших напряжениях [7].

Применение установившейся ползучести значительно сокращает количество исходных данных и упрощает их использование. Зависимости $\dot{\epsilon}_0^c(\sigma_0, T)$ обычно представляются в виде диаграмм (рис.4) или аппроксимируются степенной или показательной функциями.

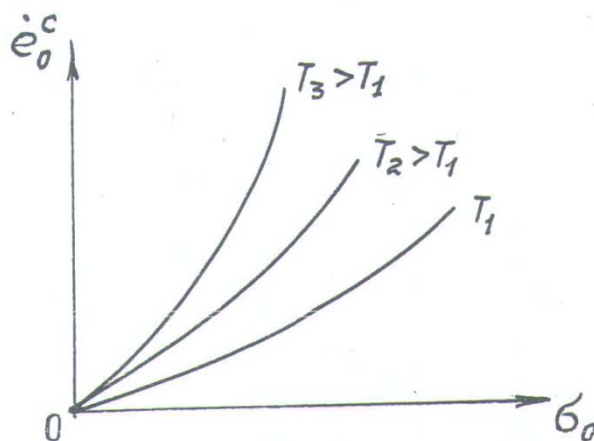


Рис.4 – Изменение скорости установившейся ползучести от напряжения [10]

В случае осесимметричного напряженного состояния соотношение (1) представляется в виде

$$\dot{\epsilon}_\alpha^c = \frac{\sigma_\alpha - \frac{1}{2}(\sigma_\beta)}{\sigma_u} \dot{\epsilon}_u^c, (\alpha \leftrightarrow \beta), \quad (3)$$

а деформации ползучести в некоторый момент времени t равны:

$$e_\alpha^c = \int_0^t \frac{\sigma_\alpha - \frac{1}{2}\sigma_\beta}{\sigma_u} \dot{\epsilon}_u^c dt, (\alpha \leftrightarrow \beta) \quad (4)$$

Таким образом, зная напряженно-деформированное состояние в оболочке, можно по формулам (3) определить скорости деформаций ползучести, и по формулам (4) определить деформации ползучести в некоторый момент времени t , используя кривые ползучести или аналитические формулы для получения \dot{e}_u^c [4; 13].

При втором подходе общие кривые ползучести перестраиваются в изохронные кривые, схема перестроения представлена на рис.5.

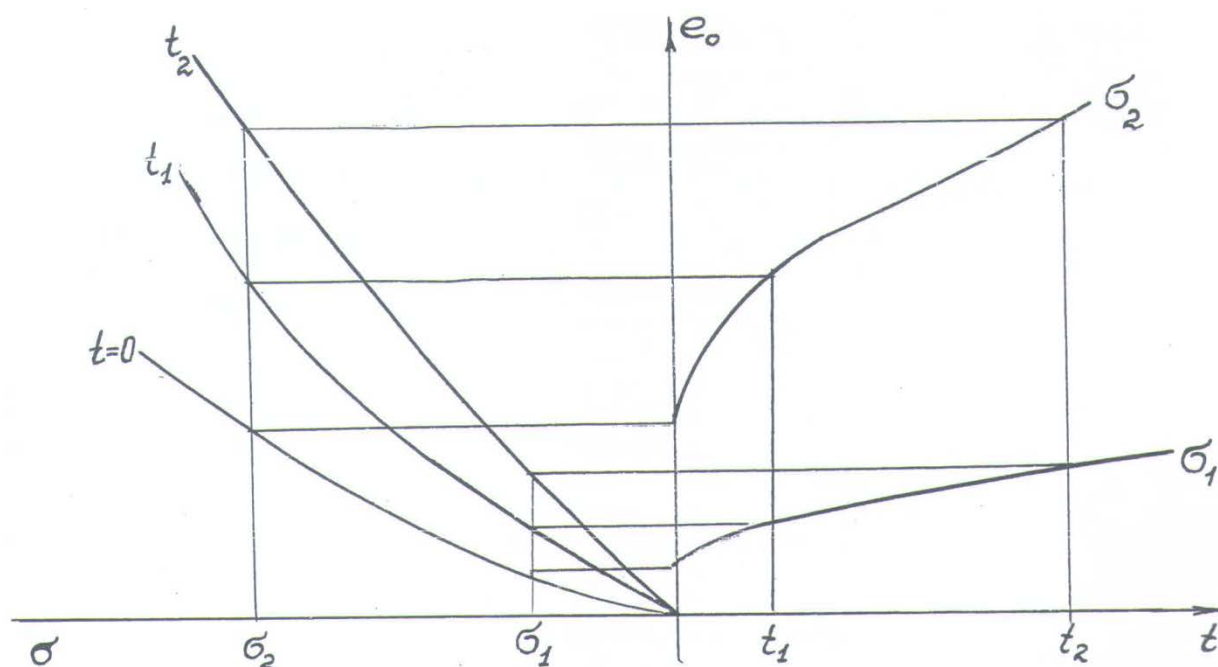


Рис.5 – Изменение деформации ползучести в зависимости от напряжения [4; 13]

Полученные слева $e_0 = f(\sigma_0)$ для фиксированных моментов времени $t_0, t_1 \dots t_n$ используются для определения напряженно-деформированного состояния оболочки в некоторый нужный момент времени t . Расчет напряженно-деформированного состояния проводится методами решения задач с физической нелинейностью, в частности, методом переменных параметров упругости [4].

Легко видеть, что здесь главным фактором, определяющим деформацию, является время нахождения под нагрузкой, как в теории старения (часто теорию

старения связывают именно с методом изохронных кривых). Напряжение и температура должны быть постоянными или мало меняться.

В данном методе не учитывается перераспределение напряжений из-за изменения формы конструкции в процессе ползучести. При нахождении напряженно-деформированного состояния в некоторый момент времени t предполагается, что в каждой точке оболочки весь промежуток времени от 0 до t сохранилось свое постоянное напряжение [2; 6; 9].

Примеры расчета

Рассматривалась цилиндрическая оболочка (ее радиус составлял 100 см, толщина 1.5 мм), подверженная осесимметричному нагружению, нагрузка составила 72 т, оболочка выполнена из материала Д16АТ. На рис.6. показаны кривые изменения деформаций в условиях ползучести. Численное решение получено методом МШП. Полная деформация постоянна и равна $0.34 * 10^{-2}$ (см. кривую 1 на рис.1.). Кривая 2 представляет распределение упруго-пластической деформации, полученной из точного решения. Кривая 3 представляет деформацию ползучести. Деформации $e^{ep}(t)$ и $e^c(t)$, полученные простым шаговым методом, представляют кривые 2", 3" соответственно.

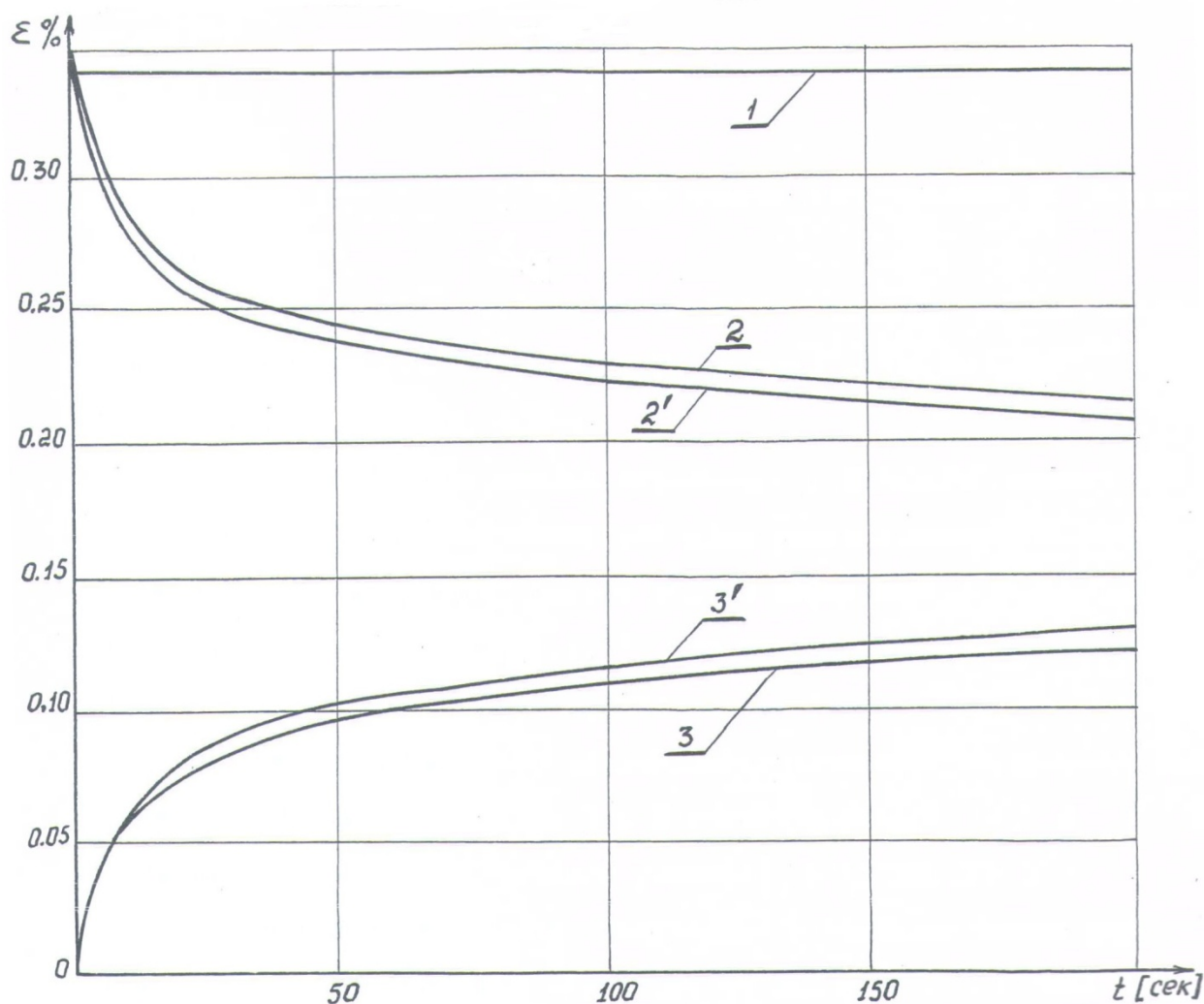


Рис.6 – Изменение деформации в условиях ползучести: 1. полная деформация, 2. упруго-пластическая деформация, 3. деформация ползучести (рис автора)

Выводы

Данный метод позволяет проводить расчет напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в условиях ползучести с достаточной степенью точности. Преимуществом данного подхода является то, что он позволяет сразу оценить напряженно-деформированное состояние в любой момент времени. Первый подход требует приближения шагами по времени от нуля до искомого момента времени

Библиографический список

1. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – М.: Изд-во Наука, 1989. – 325 с.
2. Бахвалов И.С. Численные методы. – М.: Изд-во МГУ им М.В.Ломоносова, 2005. – 636 с.
3. Биргер И.А.Б. Шофф Б.Ф. Термопрочность деталей машин. – М.: Изд-во Машиностроение, 1995. – 297 с.
4. Бутина Т.А., Дубровин В.М. Моделирование упруго-пластического поведения материала при импульсном нагружении // Инженерный журнал "Наука и инновации". – 2014. - №3(27) – 11с.
5. Вольмир А.С., Зыкин П.Г. Устойчивость оболочек при ползучести. // Тепловые напряжения в элементах турбомашин. – 1988 - №2
6. Григолюк Э.И., Липовцев Ю.В. Устойчивость оболочек в условиях ползучести // ПМТФ, 1982. - №4
7. Димитриенко Ю.И. Нелинейная механика сплошной среды. – М.: Физматгиз, 2005. – 624 с.
8. Димитриенко Ю.И. Универсальные законы механики и электродинамики сплошных сред т.2. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 559 с.
9. Димитриенко Ю.И., Соколов А.П., Разработка численного метода расчета эффективных упругих характеристик композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер "Естественные науки". – 2008. -№2 – с.50-57.
10. Дубровин В.М., Бутина Т.А. Моделирование процесса ползучести конструкционных материалов // Инженерный журнал "Наука и инновации". – 2013. - №9(21) – 18 с.
11. Качанов Л.М. Теория ползучести. – М.: Изд-во Физматгиз, 1960. – 389 с.
12. Милейко С.Т., Работнов Ю.И. Кратковременная ползучесть. – М.: Изд-во Машиностроение, 1985. – 298 с.
13. Муштари Х.М., Галимов Г.З. Нелинейная теория упругих оболочек. – Казань: Изд-во Таткнигиздат, 1985. – 437 с.
14. Работнов Ю.И. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Изд-во Наука, 1999. – 365 с.

Оригинальность 75%