

УДК 539.376

***МЕТОД РАСЧЕТА ПЛАСТИЧЕСКИХ ЗОН И ЗОН РАЗГРУЗКИ В  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ ВСЛЕДСТВИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ  
МАТЕРИАЛА***

***Бутина Т.А.***

*кандидат физико-математических наук, доцент*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)*

*Москва, Россия*

***Абдуллин С.Р.***

*старший преподаватель*

*Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)*

*Москва, Россия*

**Аннотация**

Установление работоспособности элементов современных конструкций, находящихся под внешним давлением, подразумевает исследование их напряженно-деформированного состояния в условиях пластичности и ползучести. При наступлении ползучести происходит увеличение деформаций и при неизменном нагружении. Пластичность характеризуется как неспособность реальных материалов выдерживать произвольно большие сдвиговые напряжения. Поэтому все ограничения, связанные с наличием пластичности, относятся к девиаторным (сдвиговым) составляющим полного тензора напряжений. Для расчета напряженного-деформированного состояния оболочек вращения был применен разработанный численный метод. Использование этого метода дает возможность определять напряженно-деформированное состояние конструкций, при этом

учитывается наличие температурного поля, возникающие прогибы, критические нагрузки.

**Ключевые слова:** Напряженно-деформированное состояние, пластичность, ползучесть, дифференциальные уравнения, температурное поле

***METHOD FOR CALCULATING PLASTIC ZONES AND DISCHARGE ZONES IN A CYLINDRICAL SHELL DUE TO CREEP OF THE MATERIAL***

***Butina T.A.***

*Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor*

*Bauman Moscow State Technical University*

*Moscow, Russia*

***Abdullin S.R.***

*Senior lecturer*

*Bauman Moscow State Technical University*

*Moscow, Russia*

**Annotation**

Establishing the operability of elements of modern structures under external pressure implies the study of their stress-strain state under conditions of plasticity and creep. With the onset of creep, there is an increase in deformations and with constant loading. Plasticity is characterized as the inability of real materials to withstand arbitrarily large shear stresses. Therefore, all the limitations associated with the presence of plasticity relate to the deviatoric (shear) components of the full stress tensor. The developed numerical method was used to calculate the stress-strain state of the shells of rotation. Using this method makes it possible to determine the stress-

strain state of structures, while taking into account the presence of a temperature field, deflections, critical loads.

**Keywords:** Stress-strain state, plasticity, creep, differential equations, temperature field

## Введение

Ползучесть является одним из важных свойств современных конструкционных материалов. Она наступает с ростом напряжений и температуры [2,4]. При определенных условиях возникают зоны пластичности. Учет пластичности, распределение возникающих зон пластичности необходим в прочностных расчетах. В качестве условия наступления пластичности выбрано обобщенное условие Мизеса [9]. Этот критерий хорошо описывает реальное поведение широкого класса материалов, имеет простое математическое выражение, что позволяет легко использовать его в численных расчетах.

В используемом методе расчета, подробно изложенном в [3,8] рассматривалась система из шести дифференциальных уравнений [6,11] позволяющая учитывать геометрическую и физическую нелинейности [4].

При решении задачи устойчивости необходимо решать систему из восьми уравнений [4,5]. Решение этой системы уравнений осуществлялось методом конечных разностей, применялась схема второго порядка точности [1]. Возможно включение граничных условий, при этом не усложняются рассматриваемые соотношения, не увеличивается матрица системы. В результате решения получают значения прогибов, деформации, напряжения, усилия.

В процессе решения задачи в правую часть уравнений переносились нелинейные члены, вычисленные на предыдущем шаге. К ним же добавлялись

граничные условия. Таким образом решалась неоднородная система алгебраических уравнений

$$A_{i,j}y_i = B_{i,j} \quad (1),$$

здесь матрица  $A_{i,j}$  составлена из коэффициентов при неизвестных,

$y_i$  – столбец неизвестных,

$B_{i,j}$  – соответственно столбец, составленный из свободных членов.

Нетривиальное решение системы получается при равенстве нулю определителя системы. Это условие дается получением наименьшего значения параметра (им может быть нагрузка, время и пр.). Это и дает критическую величину для рассматриваемой оболочной конструкции [7].

Примененный алгоритм позволяет:

- 1) Исследовать напряженно-деформированное состояние, определять потерю устойчивости при соответствующем уровне критической нагрузки, учитывать нагрев конструкции.
- 2) Определять перемещения края оболочки, возникновение прогибов, дает возможность расчета пластических зон и зон разгрузки в оболочке вследствие ползучести.
- 3) Оценивать со хранение работоспособности конструкции, неосесимметричную потерю устойчивости [10].

### **Цель и задачи исследования**

Целью данного исследования является определение напряженно-деформированного состояния в цилиндрической оболочке, развитие зон пластичности и разгрузки вследствие ползучести.

Известно, что явление ползучести приводит к перераспределению со временем напряженно-деформированного состояния в конструктивных  
Дневник науки | [www.dnevniknauki.ru](http://www.dnevniknauki.ru) | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

элементах даже при постоянных внешних воздействиях. С целью исследования особенностей развития напряженно-деформированного состояния в цилиндрической оболочке при постоянном осевом сжатии была решена следующая задача.

Оболочка из сплава Д16АТ радиуса  $R = 100$  мм, длины  $L = 200$  мм, толщины  $h = 1$  мм, нагретая до температуры  $T = 250^\circ\text{C}$  и нагружена осевым усилием  $T_x = 15$  кг/мм. Краевые условия принимались следующими:

$$T_x = 15 \text{ кг/мм}, \omega = -\alpha_T TR, \varphi = 0, \text{ на левом краю}$$

$$v = 0, \omega = -\alpha_T TR, \varphi = 0, \text{ на правом краю}$$

где  $v$  – перемещение точек срединной поверхности,  $\omega$  – прогиб, температурные зависимости констант взяты из [12].

### Детали и результаты расчета

Расчеты проводились до осесимметричной потери устойчивости, которая произошла при  $t = 146$  сек. На рис.1 показано развитие прогиба во времени по образующей, а на рис.2 – момента.

На рис.3 заштрихованные области соответствуют зонам разгрузки. Под разгрузкой понимается уменьшение напряжений со временем, двойной штриховкой на рис.3 выделены зоны разгрузки при пластичности. Из сопоставления результатов видно:

- а) Зоны разгрузки появляются первоначально на краю оболочки и распространяются со временем вместе с краевым эффектом вдоль образующей на всю длину;
- б) Начиная с  $t = 10$  сек зоны разгрузки приобретают периодический характер, соответствуя периоду прогиба;

- в) Каждая новая пара зон появляется сначала на поверхности оболочки, а затем соединяется в одну, сильно вытянутую в направлении образующей;
- г) При  $t > 60$  сек в оболочке появляется повторное нагружение.

На рис.4 представлено развитие пластических зон по образующей со временем. Видно, что имеет место не только расширение зон пластичности, существовавших в начальный момент, но и появление новых зон по мере распространения вдоль образующей краевого эффекта.

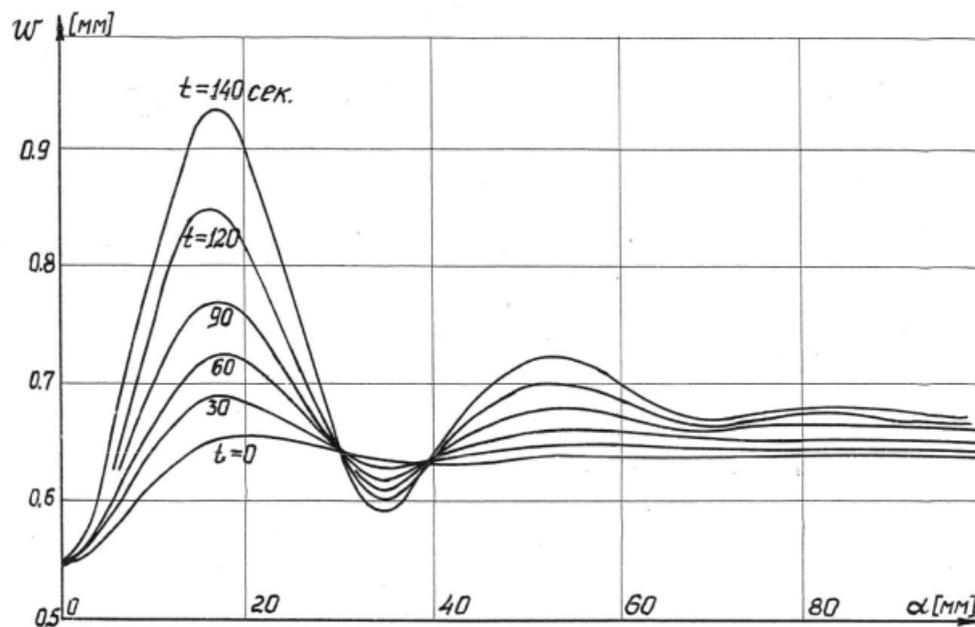


Рис. 1. Развитие прогиба во времени (рис. автора)

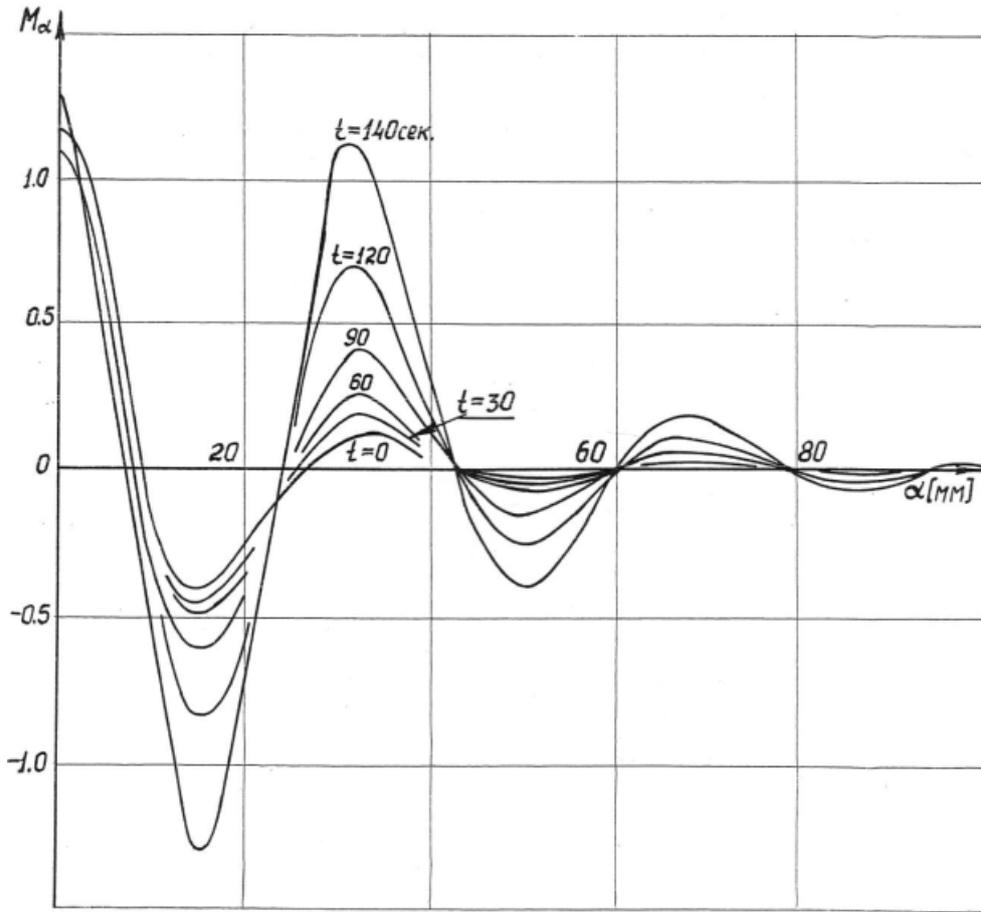


Рис. 2. Развитие момента во времени (рис. автора)

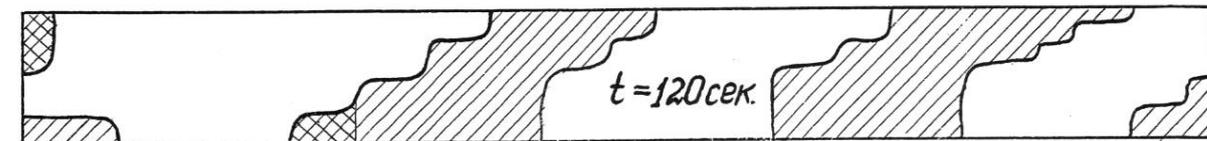
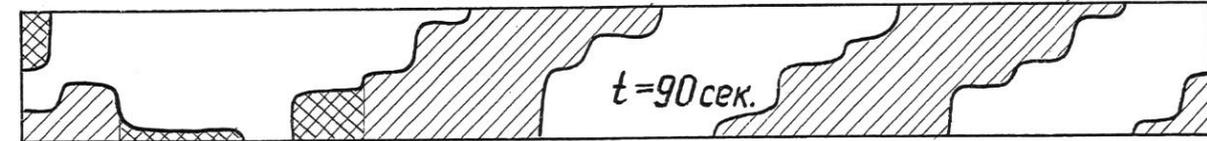
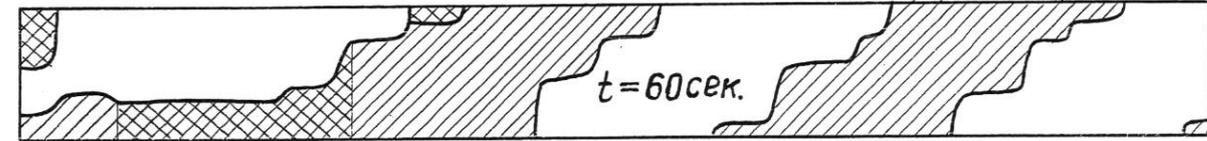
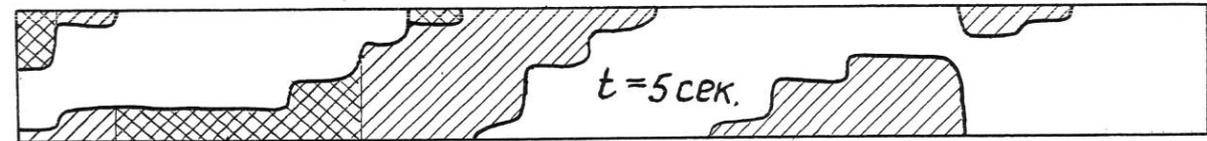
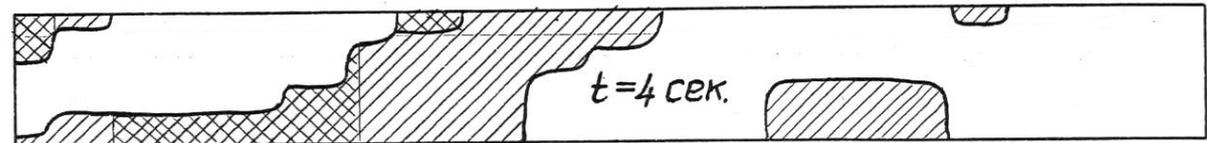
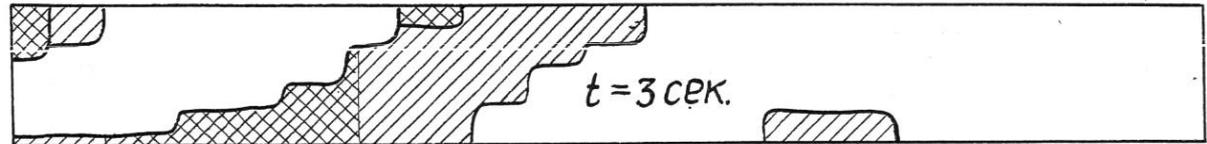
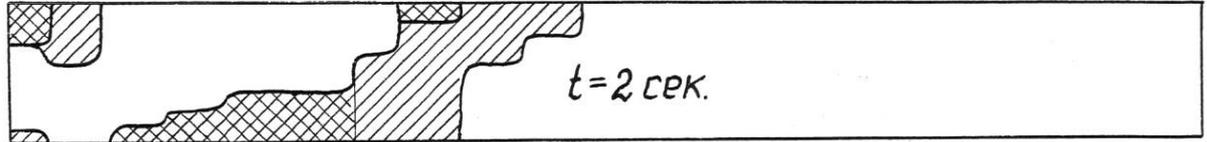
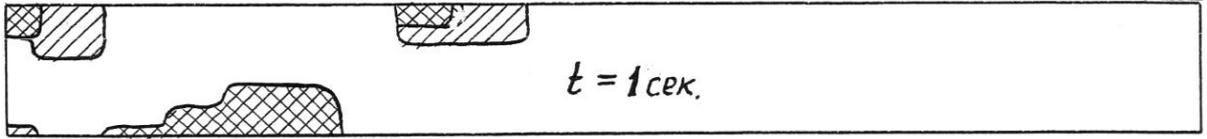


Рис. 3. Зоны разгрузки со временем и при пластичности (рис. автора)

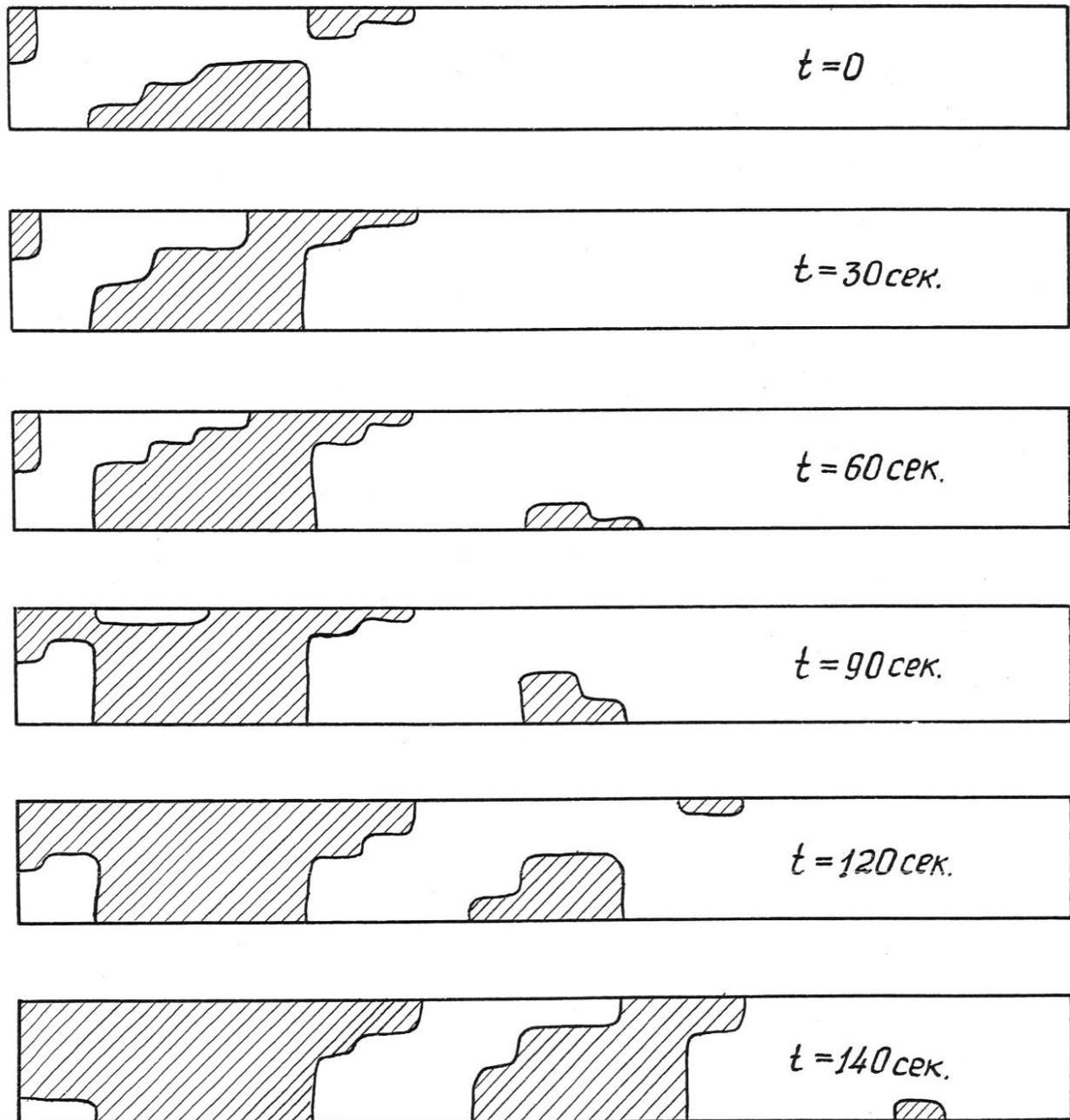


Рис. 4. Развитие пластических зон по образующей во времени (рис. автора)

## **Выводы**

Обеспечение работоспособности конструкций является решающим фактором в процессе исследования напряженно-деформированного состояния, возникающего при наличии внешнего нагружения. При этом необходимо выявление зон разгрузки, пластических зон. Даже в рассмотренном случае нагружения оболочки (внешние воздействия были постоянны) изменение напряженно-деформированного состояния во времени имело немонотонный и достаточно сложный характер. Это показывает необходимость проведения численных расчетов для правильной оценки работоспособности конструкции.

## **Библиографический список**

1. Бахвалов И.С. Численные методы / И.С. Бахвалов. – М.: МГУ им М.В. Ломоносова, 2005. – 636 с.
2. Биргер И.А. Термопрочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шофф. – М.: Изд-во Машиностроение, 1995. – 297 с.
3. Бутина Т.А. Конечно-разностный метод численного решения краевых задач прочности и устойчивости оболочек вращения в условия ползучести материала / Т.А. Бутина, В.М. Дубровин // Дневник науки. – 2022. - №9
4. Вольмир А.С. Устойчивость оболочек при ползучести / А.С. Вольмир, П.Г. Зыкин // Сб. Тепловые напряжения в элементах турбомашин, №2, 1988.
5. Григолюк Э.И. Устойчивость оболочек в условиях ползучести / Э.И. Григолюк, Ю.В. Липовец // ПМТФ. – 1982. - №4.
6. Димитриенко Ю.И., Нелинейная механика сплошной среды / Ю.И. Димитриенко. – М.: Физматгиз, 2005. – 624 с.
7. Димитриенко Ю.И. Разработка численного метода расчета эффективных упругих характеристик композиционных материалов / Ю.И. Димитриенко,

- А.П. Соколова. – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, сер. "Естественные науки", №2, 2008. – С. 50-57.
8. Дубровин В.М. Моделирование процесса ползучести конструкционных материалов / В.М. Дубровин, Т.А. Бутина // Инженерный журнал "Наука и инновации". – 2013. - №9(21) – 18 с.
9. Качанов Л.М. Теория ползучести – М.: Физматгиз, 1960. – 389 с.
10. Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть / С.Т. Милейко, Ю.И. Работнов. – М.: Изд-во Машиностроение, 1985. – 298 с.
11. Муштари Х.М. Нелинейная теория упругих оболочек / Х.М. Муштари, Г.З. Галимов. – Казань: Таткнигиздат, 1985. – 437 с.
12. Работнов Ю.И. Ползучесть элементов конструкций – М.: Наука, 1999. – 365 с.

*Оригинальность 80%*