

## РАСЧЕТЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ПРОЧНОСТЬ В УСЛОВИЯХ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

**Сычев А.И., к.т.н., доц., Сычева Т.А., к.т.н., доц.**

*(Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко)*

*В статье рассматриваются расчеты осесимметрично нагруженных оболочек вращения с учетом поперечного сдвига. Предполагается нелинейный характер деформирования материала оболочек (нелинейная упругость, ползучесть). Приводятся результаты расчетов ползучести цилиндрических оболочечных элементов оборудования перерабатывающих и пищевых производств для двух примеров.*

**Постановка проблемы.** В пищевой и перерабатывающей промышленности широко используются тонкостенные конструкции. Так в разных технологических схемах применяют аппараты для нагревания или выпаривания сырья, полуфабрикатов и продуктов. Емкостные и теплообменные аппараты представляют собой совокупность тонкостенных элементов – оболочек и пластин, которые функционируют в условиях высоких нагрузок и температур. Наиболее распространенной формой корпусов аппаратов является цилиндрическая. Днища и крышки корпусов аппаратов бывают плоскими, коническими, сферическими и эллипсоидальными.

Под воздействием внешних нагрузок и температуры в материале конструкций может развиваться такое явление как ползучесть. Под ползучестью понимают возникновение необратимых деформаций в материале под действием приложенной к нему в течение длительного времени нагрузки. Учет ползучести в прочностных расчетах пищевого и перерабатывающего оборудования важен, так как ползучесть материалов часто приводит к его разрушению. Если для стальных и чугунных деталей ползучесть существенна при температурах более 300°C, то для металлов и сплавов имеющих низкую температуру плавления, а также полимерных материалов ползучесть заметна даже при

нормальной температуре [1]. Также необходимость учета ползучести в расчетах на прочность может быть вызвана большими сроками службы оборудования, в течении которого может накопиться повреждаемость и произойти разрушение оборудования.

Среди теорий, описывающих ползучесть и накопление повреждаемости при ползучести, широкое распространение получила теория Качанова-Работнова. Повреждаемость при ползучести учитывается путем введения феноменологического параметра повреждаемости  $\omega$ . В статье рассматривается вариант теории Качанова-Работнова с временным упрочнением. Уравнения состояния записываются для скоростей деформаций ползучести  $\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr}$  и параметра повреждаемости  $\dot{\omega}$  в следующем виде:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{ij}^{cr} &= \frac{3}{2} \frac{A(\sigma_M^{eq})^n}{(1-\omega)^m} \frac{s_{ij}}{\sigma_M^{eq}} t^\chi, \\ \dot{\omega} &= \frac{B(\sigma_M^{eq})^k}{(1-\omega)^l} t^\chi,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $\sigma_M^{eq}$  – интенсивность напряжений,  $s_{ij}$  – компоненты тензора девиатора напряжений,  $A, B, n, m, k, l, \chi$  – материальные постоянные, которые определяются из базовых экспериментов.

Постановка задачи для осесимметрично нагруженных оболочек вращения с учетом поперечного сдвига при ползучести рассмотрена в [3,5]. Предполагается, что при деформировании оболочки ее сечения остаются прямолинейными, но не перпендикулярными к деформированной срединной поверхности. Угол наклона нормали к деформированной поверхности характеризуется углами сдвига. В уравнении состояния для перерезывающей силы для учета неравномерности деформаций сдвига по толщине вводится корректирующий коэффициент  $\kappa = 5/6$  [2,5]. Представленная система уравнений является начально-краевой задачей, начальным условием для которой будет решение задачи упругости данной оболочки. Ее решение ищется при помощи численных методов [5].

При проведении численных исследований рассматривались два цилиндрических оболочечных элемента корпуса пищевого аппарата: средней толщины (I) с соотношением толщины к радиусу

$h_I/R_I = 1/5$  и тонкого (II) с соотношением  $h_{II}/R_{II} = 1/20$ . Предполагалось, что края цилиндрического элемента корпуса жестко защемлены, но для одного края разрешалось его осевое перемещение. Такой выбор граничных условий сделан для того, чтобы осевая продольная сила  $N_x = const$  была равна нулю. Из-за симметрии оболочки можно рассмотреть ее половину. На левом крае граничные условия будут иметь вид:

$$w|_{\xi_1=0} = 0, \quad \theta|_{\xi_1=0} = 0, \quad (2)$$

где  $w$  – прогиб оболочки,  $\theta$  – поворот сечения оболочки при деформировании. На правом крае в силу симметрии оболочки граничные условия будут:

$$Q_1|_{\xi_1=L/2} = 0, \quad \theta|_{\xi_1=L/2} = 0, \quad (3)$$

где  $Q_1$  – перерезывающая сила.

Геометрические параметры и нагрузка для оболочки I средней толщины ( $h_I/R_I = 1/5$ ) были толщина  $h_I = 2 \cdot 10^{-1}$  м, радиус  $R_I = 1$  м, длина  $L_I = 2$  м, внутреннее давление  $p_I = 32$  МПа.

Для тонкой оболочки II ( $h_{II}/R_{II} = 1/20$ ) толщина соответственно равна  $h_{II} = 5 \cdot 10^{-2}$  м, внутреннее давление выбиралось таким, чтобы получить напряжения для двух рассматриваемых оболочек в задаче упругости близкие друг к другу,  $p_{II} = 8$  МПа. Длина оболочки II подбиралась так, чтобы выполнялось равенство:

$$\beta_I L_I = \beta_{II} L_{II}, \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{h^2 R^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, учитывая (4) и (5), получим:

$$L_{II} = L_I / \sqrt{h_I/h_{II}}. \quad (6)$$

Это сделано для того, чтобы оболочка I и оболочка II были «одинаковой» длины по критерию длинны оболочек (4).

В качестве материала оболочек рассматривается алюминиевый сплав BS 1472 при температуре 150°C [4]. Материальные постоянные ползучести в уравнении (1) были:  $A = 3,511 \cdot 10^{-31}$  МПа<sup>-n</sup> ч<sup>-(1+z)</sup>;  $B = 1,960 \cdot 10^{-23}$  МПа<sup>-k</sup> ч<sup>-(1+z)</sup>;  $k = 8,220$ ;  $n = m = 11,034$ ;  $l = 12,107$ ;

$\chi = -0,3099$ . Константы упругости были  $E = 71,1 \cdot 10^3$  МПа;  $\nu = 0,3$ .

На Рис. 1 показано распределение интенсивности напряжений на внешней (внутренней) поверхности оболочки по длине оболочки. Серыми линиями обозначено решение задачи упругости, черными – решение ползучести в момент окончания скрытого разрушения. Сплошными линиями показано решение для оболочки II, пунктиром для оболочки I. На Рис. 2 показано распределение интенсивности напряжений по толщине оболочки в сечении, где происходит разрушение оболочки.

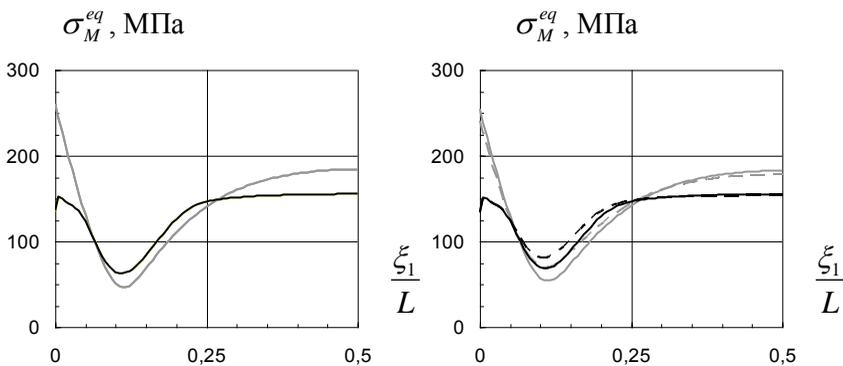


Рис. 1. Распределение интенсивности напряжений по длине оболочки из расчетов по теории оболочек Кирхгоффа-Лява (а) и теории с учетом сдвига (б)

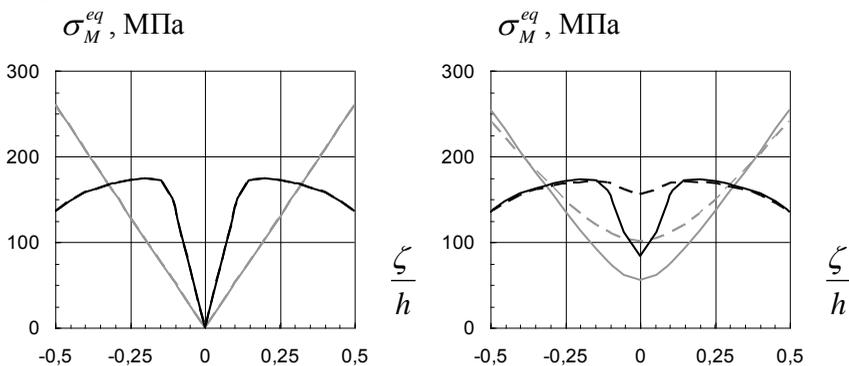


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений по толщине в сечении, где происходит разрушение из расчетов по теории оболочек Кирхгоффа-Лява (а) и теории с учетом сдвига (б)

Таблица

Время до разрушения конструкции  $t^*$ , ч.

	Оболочка I ( $h_I/R_I = 1/5$ )	Оболочка II ( $h_{II}/R_{II} = 1/20$ )
Теория Кирхгоффа-Лява	21000	21000
Сдвиговая теория	26485 (26%)	22810 (9%)

Из представленных результатов видно, что в случае расчета двух оболочек по теории Кирхгоффа-Лява получаем полное совпадение интенсивности напряжений как по длине оболочки (Рис. 1а), так и по толщине (Рис. 2а) и для задачи упругости, и для задачи ползучести. В случае расчета по теории с учетом поперечного сдвига отличие интенсивности напряжений будет и для задачи упругости, и для задачи ползучести (Рис. 1б, Рис. 2б). Это объясняется тем, что дифференциальный оператор в случае учета поперечного сдвига зависит от соотношения  $h/R$ . Из результатов (Рис. 2) также видно, что в случае учета поперечного сдвига интенсивность напряжений в средней части оболочки по толщине не равна нулю.

В таблице представлено время до разрушения для рассмотренных оболочек в случае применения теории Кирхгоффа-Лява и сдвиговой теории. Значения времени до разрушения, полученные по теории Кирхгоффа-Лява для двух оболочек, совпадают. В случае теории с учетом поперечного сдвига время до разрушения отличается – в случае тонкой оболочки (II) на 9% и в случае оболочки средней толщины (I) на 26%. Отличие максимальной интенсивности напряжений между двумя оболочками при расчетах по сдвиговой теории для решения задачи упругости составляло 5,5%, а отличие времени до разрушения двух оболочек составило 16%.

**Выводы.** Таким образом из расчетов видно, что применение теории Кирхгоффа-Лява дает для рассмотренных примеров недооценку времени до разрушения, причем как для оболочки средней толщины (I), так и для тонкой оболочки (II). Применение теории с учетом деформаций поперечного сдвига позволяет более точно получить значения времени до разрушения, а значит увеличить срок службы аппарата.

### Список литературы

1. Соколов В.И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. М.:Машиностроение, 1983. – 447 с.
2. Пелех Б.Л. Теория оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. – Киев: Наукова думка, 1973. – 248 с.
3. Галишин А.З., Шевченко Ю.Н. К расчету термоупругого напряженного состояния оболочек вращения средней толщины // Прикладная механика. – 2008. – Вып. 44, № 5. – С. 58-67.
4. Kowalevski Z.L., Hayhurst D.R., Dyson B.F. Mechanisms-based creep constitutive equations for an aluminium alloy // J. of Strain Analysis. – 1994. – Vol. 29. – №4. – P. 309-316.
5. Сычев А.И., Сычева Т.А. Применение уточненных теорий оболочек для расчетов оборудования перерабатывающих и пищевых производств // Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ. – 2008. – Вип. 74. – С. 39-45.

### **РОЗРАХУНОК ОБОЛОНКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРЕБНИХ ТА ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ НА МІЦНОСТЬ В УМОВАХ НЕЛІНІЙНОГО ДЕФОРМУВАННЯ**

*У статті розглядається розрахунки вісесіметрично навантажених оболонок обертання з урахуванням поперечного зсуву. Припускається, що матеріал оболонок має нелінійний характер деформування (нелінійна пружність, повзучість). Наведені результати розрахунків повзучості циліндричних оболонкових елементів обладнання переробних та харчових виробництв для двох прикладів.*

### **CALCULATIONS OF ELEMENTS OF THE EQUIPMENT OF PROCESSING AND FOOD MANUFACTURES ON DURABILITY IN THE CONDITIONS OF NONLINEAR DEFORMATION**

*In article it is considered calculations the loaded covers of rotation taking into account cross-section shift. Nonlinear character of deformation of a material of covers (nonlinear elasticity, creep) Is supposed. Results of calculations of creep cylindrical оболочечных elements of the equipment of processing and food manufactures for two examples are resulted.*