

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОРПУСАХ АВТОКЛАВОВ СТРОЙИНДУСТРИИ

*А.А. Кожухарь, В.О. Білоус, П.О. Білоус.* **Оцінка температурних напружень у корпусах автоклавів будіндустрії.** Дається оцінка нормальних розтягувальних температурних напружень, які виникають у нижній частині корпуса автоклава в результаті нелінійного розподілу температурного поля по висоті його поперечного перерізу. В робочому стані автоклава вони можуть становити більше 30 % від припустимих напружень.

*А.А. Кожухарь, В.А. Белоус, П.А. Белоус.* **Оценка температурных напряжений в корпусах автоклавов стройиндустрии.** Дается оценка нормальных растягивающих температурных напряжений, которые возникают в нижней части корпуса автоклава в результате нелинейного распределения температурного поля по высоте его поперечного сечения. В рабочем состоянии автоклава они могут составлять более 30 % от допускаемых напряжений.

*A.A. Kozhukhar, V.A. Belous, P.A. Belous.* **Estimation of temperature stresses in bodies of autoclaves of building industry.** The estimation of normal tensile temperature stresses is given which arise in the bottom part of the body of an autoclave as a result of nonlinear distribution of a temperature field along the height of its cross section. In the operating condition of the autoclave they can account for more than 30 % from permissible stresses.

В промышленности строительных материалов для термически-влажностной обработки силикатного кирпича широко используются автоклавы. Корпуса этих строительных машин представляют собой тонкостенные цилиндрические оболочки большой емкости с быстросъемными крышками, которые работают под высоким внутренним давлением пара при значительных весовых нагрузках [1]. Все автоклавы опираются на концевые и несколько промежуточных опор. При этом в рабочем состоянии появляется температурный перепад между верхней и нижней образующими корпуса, который вызван тем, что в нижней части автоклава скапливаются продукты, образующиеся при обработке изделий, и сконденсировавшийся пар. Как правило, температура нижней образующей в условиях эксплуатации меньше, чем температура верхней. В результате автоклав под воздействием температурного поля начинает изгибаться со стрелой прогиба, направленной вверх [2]. Возникающие температурные напряжения накладывают отпечаток на напряженно-деформированное состояние (НДС) корпуса автоклава.

Действующие нормативные расчетные документы практически не отражают отмеченную температурную особенность работы автоклавов, что нельзя считать нормальным, т.к. дополнительные температурные напряжения совместно с напряжениями, вызванными действием внутреннего давления и локальных нагрузок (веса поезда вагонеток с изделиями, веса самого корпуса и расположенных на нем механизмов), могут вызвать напряженное состояние, превышающее допускаемое. В условиях малоциклового нагружения автоклава и действия щелочного конденсата это является одной из главных причин появления трещин в его корпусе. Поэтому для обеспечения надежной и долговечной работы автоклавов необходима правильная оценка растягивающих температурных напряжений, которые возникают в наиболее нагруженной нижней части корпуса.

При рассмотрении корпуса автоклава как длинномерного объекта типа балки, считая распределение температуры по высоте его поперечного сечения ступенчатым, предложены приближенные формулы для оценки температурных напряжений [3]. В дальнейшем, при таком же балочном подходе было получено выражение для осевых температурных напряжений в случае линейного температурного поля [4]. В действительности, как показал анализ многочисленных экспериментальных исследований, это поле имеет нелинейный характер [2]. Поэтому рассмотренную на базе такого поля задачу оценки температурных напряжений, возникающих в корпусе автоклава, когда последний представлен более реальной для него оболочечной расчетной схемой, следует считать вполне актуальной.

Ввиду того, что автоклав от неравномерного распределения температуры поднимается с промежуточных опор, рассмотрим его корпус как цилиндрическую оболочку длиной  $L$ , радиуса  $R$

и толщиной стенки  $h$ , опертую только по торцам на крайние опоры; при этом закрывающие корпус крышки играют роль жестких диафрагм. Используем на срединной поверхности недеформированной оболочки подвижную цилиндрическую систему координат  $xuz$ , направив ось  $x$  по верхней образующей цилиндра, ось  $y$  — по дуге окружности, а ось  $z$  — нормально к срединной поверхности, считая координату  $z$  положительной по направлению к центру кривизны. Обозначим перемещения точки срединной поверхности вдоль осей  $x, y, z$  соответственно через  $u, v, w$  (рис. 1). Очевидно, что окружная координата угол —  $\varphi = y/R$ .

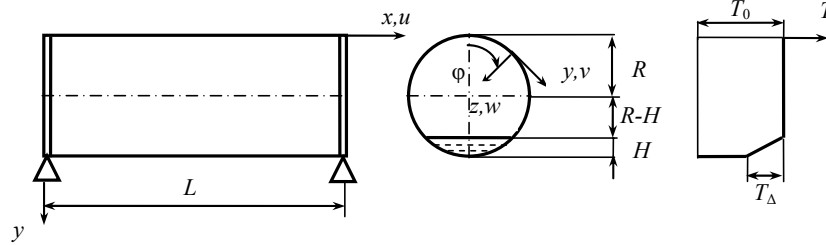


Рис. 1. Расчетные схемы автоклава и распределения температуры по высоте поперечного сечению

В практике эксплуатации автоклавов обычно распределение температурного поля выглядит так: вдоль продольной оси температура остается постоянной, по высоте от верхней образующей до зеркала конденсата (при его наличии) она фактически не меняется, а затем довольно резко уменьшается. Общепринято, что изменением температуры по толщине оболочки можно пренебречь. В рабочем состоянии могут быть разные высоты уровня конденсата  $H$ , вследствие чего возникают и разные температурные перепады. Поэтому целесообразно представить температуру стенки оболочки  $T(\varphi)$  в виде

$$T = T_0 - T_{\Delta} \exp(-\gamma_H \psi), \quad (1)$$

где  $\psi = \pi - \varphi$ ;

$T_0$  — температура на уровне верхней образующей;

$T_{\Delta}$  — температурный перепад;

$\gamma_H$  — коэффициент, зависящий от высоты  $H$ .

Для оценки НДС корпуса воспользуемся дифференциальными уравнениями равновесия тонкостенной цилиндрической оболочки в перемещениях при наличии температурного поля [5]

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial \varphi} - \frac{\mu}{R} \frac{\partial w}{\partial x} = (1+\mu) \alpha_T \frac{\partial T}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\frac{1+\mu}{2R} \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \varphi} + (1+\alpha_R) \left( \frac{1-\mu}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \varphi^2} \right) - \frac{1}{R^2} \frac{\partial w}{\partial \varphi} + \alpha_R \left( \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial \varphi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^3 w}{\partial \varphi^3} \right) = \frac{1+\mu}{R} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial \varphi}; \quad (3)$$

$$\frac{\mu}{R} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \alpha_R \left( \frac{\partial^3 v}{\partial x^2 \partial \varphi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^3 v}{\partial \varphi^3} \right) - \frac{w}{R^2} - \alpha_R R^2 \nabla^4 w = \frac{1+\mu}{R} \alpha_T T; \quad (4)$$

где  $\alpha_R = \frac{h^2}{12R^2} \ll 1$ ;

$$\nabla^4 w = \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{2}{R^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial \varphi^2} + \frac{1}{R^4} \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4};$$

$\alpha_T$  — коэффициент линейного температурного расширения материала корпуса;

$\mu$  — коэффициент Пуассона этого материала.

Граничные условия свободного опирания торцов оболочки имеют вид

$$w|_{x=0,L} = 0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}|_{x=0,L} = 0. \quad (5)$$

Осевые нормальные напряжения [6]

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2} \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\mu}{R} \left( \frac{\partial v}{\partial \varphi} - w \right) - \alpha_T (1+\mu) T \right], \quad (6)$$

где  $E$  — модуль упругости первого рода материала корпуса.

Для выполнения граничных условий (5) и условий периодичности по окружной координате  $\varphi$  выражения для перемещений  $u$ ,  $v$ ,  $w$  аппроксимируем зависимостями

$$u(x, \varphi) = \cos \frac{\pi x}{L} \left( u_0 + \sum_{n=1}^N u_n \cos n\varphi \right); \quad (7)$$

$$v(x, \varphi) = \sin \frac{\pi x}{L} \left( v_0 + \sum_{n=1}^N u_n \sin n\varphi \right); \quad (8)$$

$$w(x, \varphi) = \sin \frac{\pi x}{L} \left( w_0 + \sum_{n=1}^N w_n \cos n\varphi \right), \quad (9)$$

где  $N$  — число членов ряда Фурье.

Пусть в первом приближении равномерная по длине автоклава температура

$$T = \sin \frac{\pi x}{L} \frac{4}{\pi} [T_0 - T_\Delta \exp(-\gamma_H \Psi)].$$

Разложим ее также в ряд Фурье по координате  $\varphi$  и будем учитывать только первый член

$$T(x, \varphi) = \sin \frac{\pi x}{L} \frac{4}{\pi} \left( t_0 + \sum_{n=1}^N t_n \cos n\varphi \right), \quad (10)$$

$$\text{где } t_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi [T_0 - T_\Delta \exp(-\gamma_H \Psi)] d\varphi; \quad t_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi [T_0 - T_\Delta \exp(-\gamma_H \Psi)] \cos n\varphi d\varphi.$$

Подставив выражения (7)...(9) в уравнения (2)...(4), получаем систему уравнений относительно коэффициентов  $u_n$ ,  $v_n$ ,  $w_n$  в зависимости от коэффициентов  $t_n$  ( $n=0, 1, 2, 3, \dots, N$ ):

$$\begin{aligned} & - \left( \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{1-\mu}{2R^2} n^2 \right) u_n + \frac{1+\mu}{2R} \frac{\pi}{L} n v_n - \frac{\mu}{R} \frac{\pi}{L} w_n = (1+\mu) \alpha_T \frac{\pi}{L} \frac{4t_n}{\pi}; \\ & \frac{1+\mu}{2R} \frac{\pi}{L} n u_n - (1+\alpha_R) \left( \frac{1-\mu}{2} \frac{\pi^2}{L^2} + \frac{n^2}{R^2} \right) v_n + \left[ \frac{n}{R^2} + \alpha_R \left( \frac{\pi^2}{L^2} n + \frac{n^3}{R^2} \right) \right] w_n = - \frac{1+\mu}{R} \alpha_T n \frac{4t_n}{\pi}; \\ & - \frac{\mu}{R} \frac{\pi}{L} u_n + \left[ \frac{n}{R^2} + \alpha_R \left( \frac{\pi^2}{L^2} n + \frac{n^3}{R^2} \right) \right] v_n - \left[ \frac{1}{R^2} + \alpha_R R^2 \left( \frac{\pi^4}{L^4} + \frac{2}{R^2} \frac{\pi^2 n^2}{L^2} + \frac{n^4}{R^4} \right) \right] w_n = \frac{1+\mu}{R} \alpha_T \frac{4t_n}{\pi}. \end{aligned}$$

Найдя отсюда выражения для этих коэффициентов, получим окончательные зависимости (7...9) и далее, на базе выражения (6), формулу для температурных осевых нормальных напряжений

$$\begin{aligned} \sigma(x, \varphi) = \frac{E}{1-\mu^2} \left( -\sin \frac{\pi x}{L} \right) & \left\{ \left[ \frac{\pi}{L} u_0 + \frac{\mu}{R} w_0 + \frac{4(1+\mu)\alpha_T}{\pi} t_0 \right] + \right. \\ & \left. + \sum_{n=1}^N \left[ \frac{\pi}{L} u_n + \frac{\mu}{R} (n v_n + w_n) + \frac{4(1+\mu)\alpha_T}{\pi} t_n \right] \cos n\varphi \right\}. \quad (11) \end{aligned}$$

По предлагаемому алгоритму была составлена вычислительная программа на языке TURBO PASCAL. Очевидно, чтобы получить удовлетворительные результаты, следует в рядах, аппроксимирующих распределение перемещений и температуры, учитывать большое число членов ряда  $N$ .

В проведенных расчетах принимались следующие параметры автоклава:  $L = 19 \text{ м} = 19000 \text{ мм}$ ,  $R = 1 \text{ м} = 1000 \text{ мм}$ ,  $h = 14 \text{ мм}$ ,  $\alpha_T = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ ,  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ ,  $\mu = 0,3$ ,  $T_0 = 187^\circ$ ,  $T_\Delta = 50^\circ$ ,  $\gamma_H = 7,0$ ,  $H = 15 \text{ см} = 150 \text{ мм}$ . Результаты, полученные для радиальных перемещений (прогибов)  $w$  и осевых нормальных напряжений  $\sigma_x$  в среднем сечении корпуса автоклава при  $N=30$ , представлены, соответственно, на рисунках 2 и 3.

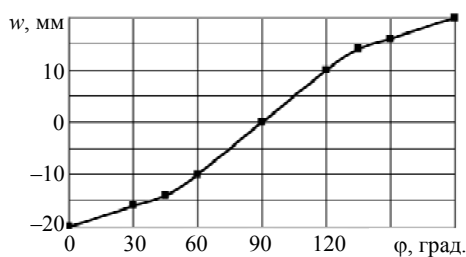


Рис. 2. Эюра радиальных перемещений согласно зависимости (9)

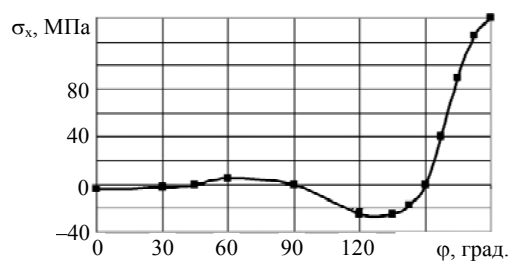


Рис. 3. Эюра осевых нормальных напряжений согласно зависимости (11)

На основании полученных расчетов можно сделать следующие выводы:

— Радиальное перемещение в опасном среднем сечении доходит до значения  $w = 20$  мм, превышающего толщину стенки корпуса.

— Возникающие в этом сечении осевые нормальные температурные напряжения на уровне нижней образующей  $\sigma_x = 145$  МПа могут составить более 30% от допускаемых напряжений для материала корпуса.

— В нижней части корпуса до уровня конденсата имеют место наиболее опасные, с позиций трещиностойкости, растягивающие напряжения, а остальная часть корпуса подвергается сжатию.

### Литература

1. Мазуров, Д.Я. Теплотехническое оборудование заводов вяжущих материалов / Д.Я. Мазуров. — М.: Стойиздат, 1975. — 287 с.
2. Перепелкин, Л.Н. К вопросу о температурных напряжениях, возникающих в автоклавах строительной индустрии от температурных неравномерностей по высоте сечения / Л.Н. Перепелкин // Тр. ВНИИСтроммаша. — Гатчина, 1981. — Вып. 22. — С. 111 — 122.
3. Новаков, Е.И. Инженерный метод расчета максимальных температурных напряжений в горизонтальном автоклаве / Е.И. Новаков // Тр. ВНИИЦеммаша. — Тольятти, 1985. — Вып. 28. — С. 68 — 76.
4. Кузнецов, С.Н. Определение температурных напряжений в корпусах автоклавов строительной индустрии / С.Н. Кузнецов, В.П. Бухин // Тр. ВНИИЦеммаша. — Тольятти, 1986. — Вып. 29. — С. 87 — 93.
5. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
6. Тимошенко, С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. — М.: Наука, 1966. — 636 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Оробей В.Ф.

Поступила в редакцию 25 июня 2009 г.