

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 624.04:624.014

**К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СБОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

© 2016 С.А. Ращепкина

** Балаковский инженерно-технологический институт – филиал ФГАОУ ВПО
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Балаково, Саратовская обл., Россия*

В работе предлагается емкость из стержневых элементов полого поперечного сечения предназначенная для хранения различных веществ АЭС. Рассмотрена устойчивость стержневого элемента на центральное сжатие. Получены выражения для определения критических напряжений стержневых элементов. Показано, что изменение критических напряжений происходит при увеличении коэффициента деформирования полосовых заготовок в процессе создания полого элемента. При этом критические напряжения относительно оси x увеличиваются с увеличением коэффициента раздутия, а критические напряжения относительно оси y заметно уменьшаются. Приводится номограмма показывающая изменение критических напряжений в направлении центральных осей.

Ключевые слова: реконструкция АЭС, металл, ребристая оболочка, полый элемент, расчет, устойчивость.

Поступила в редакцию 10.02.2016 г.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ РАСЧЕТА

При проектировании и реконструкции объектов АЭС возникает необходимость в строительстве эффективных металлических цилиндрических емкостей для различных веществ. Известные конструктивные решения емкостей обладают рядом недостатков, поэтому существует потребность в разработке новых конструктивных решений безопасных, надежных и недорогих емкостей. К специфике предлагаемой конструкции цилиндрической емкости следует отнести – сборка ее из полых элементов. В основе создания полого элемента лежит деформация предварительно сваренных между собой по продольным и поперечным кромкам двух полос требуемой ширины и длины. Деформацию полос производят сжатым воздухом, подаваемым через штуцер в пространство между полосами. За счет пластических свойств и конечной изгибной жесткостью стали полосы остаются в деформированном состоянии и после снятия избыточного давления. В результате из плоских заготовок образуется стержневой элемент полого поперечного сечения (рис.1) [1, 2, 4-6].

При действии на цилиндрическую емкость вертикальной сжимающей нагрузки в стержневых полых элементах возникают значительные сжимающие напряжения, которые в сочетании с начальным моментным возмущением и возможными несовершенствами поверхности емкости могут существенно понизить критические сжимающие напряжения, вызвав потерю ее устойчивости. Поэтому для более надежного проектирования емкостей из полых стержневых элементов методы их расчета нуждаются в совершенствовании. В работе рассматривается расчет и анализ

работы полых элементов на осевое сжатие. Ребристую оболочку емкости можно рассматривать как составную систему, образуемую из отдельно стоящих стержневых полых элементов, закрепленных шарнирно вверху и внизу (рис.1). Здесь t_s – толщина стенки металлического элемента; h_1 и h_2 – соответственно высота и ширина элемента; H (ℓ_s) – длина элемента.

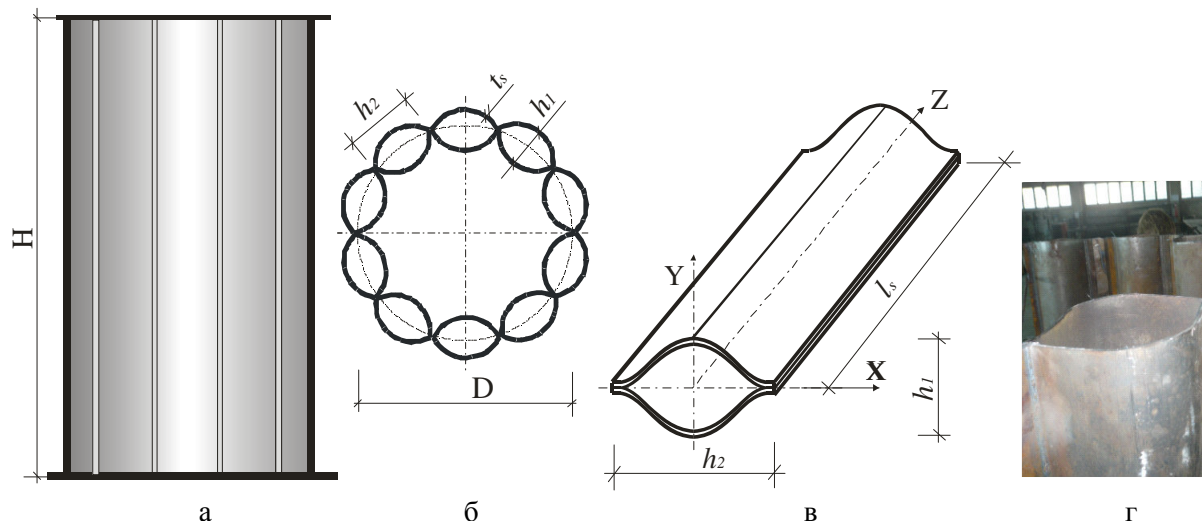


Рис. 1. – Цилиндрическая емкость из сборных полых элементов:
а – общий вид; б – поперечное сечение; в – полый элемент; г – натурный фрагмент

Для длинных оболочек должны соблюдаться условия:

$$\frac{t_s}{h_2} \leq 0,1; \quad \frac{h_2}{\ell_s} \leq 0,1.$$

где ℓ_s – длина полого элемента;

h_1 – высота полого элемента,

$$h_1 = 2k_p h_s / \pi \quad \text{или} \quad h_1 = 2r(1 - \cos \frac{\alpha}{2});$$

$$h_2 \text{ – ширина полого элемента, } h_2 = k_c h_s \quad \text{или} \quad h_2 = 2r \sin \frac{\alpha}{2};$$

α – половина угла раскрытия полого элемента;

h_s – ширина заготовки, из которой сформирован полый элемент;

r – радиус полого элемента;

k_p, k_c – коэффициенты раздутия и сжатия, которыми задаются в зависимости от требуемых размеров полого элемента, $k_p = h_1 \pi / h_s$; $k_c = h_2 / h_s$.

При $t_s = 1 \dots 6$ мм; $h_2 = 300 \dots 15000$ мм; $\ell_s = 6000 \dots 12000$ мм имеем:

$$\frac{t_s}{h_2} = 0,067 \dots 0,02 \ll 0,1; \quad \frac{h_2}{\ell_s} = 0,05 \dots 0,025 \ll 0,1.$$

Таким образом, полые элементы можно отнести к длинным цилиндрическим оболочкам. Рассмотрим устойчивость стержневого полого элемента на центральное сжатие при отсутствии воздействия содержимого (полые элементы и емкость порожние).

2. ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОЛОГО ЭЛЕМЕНТА НА ОБЩУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ

Согласно [3], если задано поперечное сечение тонкостенного стержня, то можно составить выражения для компонентов приведенных нагрузок:

$$\left. \begin{aligned} EI_y \xi^{IV} + P \xi'' + (M_x + a_y P) \theta'' &= 0, \\ EI_x \eta^{IV} + P \eta'' + (M_y - a_x P) \theta'' &= 0, \\ (M_x + a_y P) \xi'' + (M_y - a_x P) \eta'' + EI_y \theta^{IV} + (r^3 P + 2\beta_x M_y - 2\beta_y M_x - GI_d) \theta'' &= 0. \end{aligned} \right\} (1)$$

где $\xi = Ae^{kz}$, $\eta = Be^{kz}$, $\theta = Ce^{kz}$;

E – модуль упругости;

G – модуль упругости 2-го рода (модуль сдвига);

I_x и I_y – моменты инерции соответственно относительно осей x и y ;

I_ω – бимомент; для стержней-оболочек, $I_\omega = \int_A x^2 y^2 dA$;

I_d – момент инерции при чистом кручении, $I_d = bt_s^3 / 3$;

r – геометрическая характеристика, $r^2 = a_x^2 + a_y^2 + \frac{I_x + I_y}{A}$.

Рассмотрим случай когда концы стержня имеют шарнирные концы (при этом, концевые сечения закреплены от перемещений в плоскости поперечного сечения и свободны от нормальных напряжений). Для такого стержня граничные условия представляются в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \text{при } z=0 \quad \xi = \eta = \theta, \quad \xi' = \eta' = \theta'; \\ \text{при } z=l_s \quad \xi = \eta = \theta, \quad \xi' = \eta' = \theta', \end{aligned} \right\} (2)$$

При граничных условиях (2) решение уравнений (1), будет в виде:

$$\xi = A \sin \frac{n\pi z}{l_s}, \quad \eta = B \sin \frac{n\pi z}{l_s}, \quad \theta = C \sin \frac{n\pi z}{l_s}, \quad (3)$$

где A, B, C – постоянные коэффициенты, ($n=1, 2, 3, \dots$).

Если поперечное сечение стержня имеет две симметрии (рис.1,б), то в этом случае центр изгиба совпадает с центром тяжести. Для координат центра изгиба имеем: $a_x = a_y = 0$. Система уравнений (1) распадается на три независимых дифференциальных уравнения:

$$\left. \begin{aligned} EI_y \xi^{IV} + P \xi'' &= 0, \\ EI_x \eta^{IV} + P \eta'' &= 0, \\ EI_\omega \theta^{IV} + (r^2 P - GI_d) \theta'' &= 0. \end{aligned} \right\} (4)$$

Решение запишется в виде:

$$(P_x - P)(P_y - P)(P_\omega - P) \cdot r^2 = 0.$$

Отсюда для трех критических сил P_1, P_2, P_3 получаем выражения:

$$P_1 = P_x; P_2 = P_y; P_3 = P_\omega. \quad (5)$$

Первые две критические силы совпадают с эйлеровыми силами, третья – соответствует крутильной форме потери устойчивости с центром кручения, совпадающим с центром тяжести сечения. Расчеты и анализ проведенные автором показал, что критические силы кручения P_ω очень велики по сравнению с P_x и P_y , поэтому ими можно пренебречь, так как решающими являются силы изгиба. Если пренебречь кручением, то имеем только эйлеровые критические силы.

Рассматривая симметричное полое поперечное сечение (рис.1,в) используем эйлеровую формулу, причем относительно оси $x-x$, где жесткость будет меньшей, при этом вводя, поправочные коэффициенты, полученные на основе эксперимента, найдем критическую силу общей устойчивости стержневого полого элемента:

$$P_x = N_{cr} = k_1 k \pi^2 \frac{EI_x}{\ell_s^2}, \quad (6)$$

где k_1 – коэффициент, зависящий от размеров полого элемента;

k – коэффициент, зависящий от длины и вида концов полого стержневого элемента.

Учитывая, что напряжения при центральном сжатии:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A},$$

критические напряжения в безразмерном виде можно представить в виде:

$$\bar{\sigma}_{cr} = \eta \pi^2 \frac{E}{R_y} \cdot \frac{I_x}{\ell_s^2 A}. \quad (7)$$

где $\eta = k_1 \cdot k$ – коэффициент изменения формы полого элемента; согласно экспериментальным данным [4] для практических расчетов можно принять $k_1=0,56$ и $k=0,99$ (при отсутствии плоских концов, когда создание полого элемента выполняется в специальном кондукторе) [5];

R_y – расчетное сопротивление металла по пределу текучести для полого элемента;

I_x – момент инерции сечения стержня полого поперечного сечения, который можно определить по формуле [4]:

$$I_x = n_1 \beta_1 t_s h_s^3. \quad (8)$$

где n_1 и β_1 – коэффициенты, принимаемые по номограмме (рис. 2) составленной автором в зависимости от величины давления сжатого воздуха необходимого для создания полого элемента заданных размеров.

С учетом (8) после преобразований получим:

$$\bar{\sigma}_{cr} = 0,5 \cdot \eta \cdot n_1 \cdot \beta_1 \left(\frac{h_s}{\ell_s} \right)^2 \frac{E}{R_y}. \quad (9)$$

Проведем численный эксперимент с целью выявления влияния геометрических параметров полого элемента и величины давления сжатого воздуха на критические напряжения общей устойчивости (рис.1).

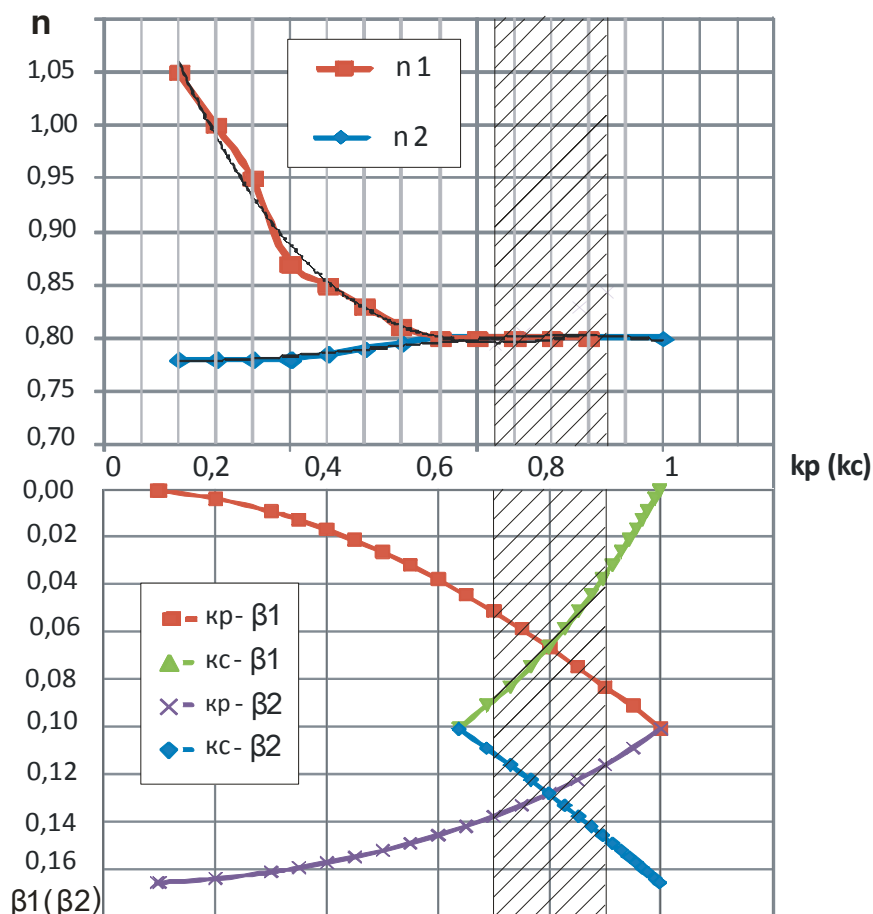


Рис. 2. – Зависимость « $k_p - n - \beta$ »

3. УСТАНОВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВНОЙ ШИРИНЫ ПОЛОС НА КРИТИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Пример 1. Требуется найти критические напряжения при следующих исходных данных: модуль упругости стали $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа; толщина стенки полого элемента $t_s = 3$ мм; $R_y = 230$ МПа; коэффициент раздутья полого элемента $k_p = 0,8$; условная ширина полос $\bar{h}_s = h_s / \ell_s = 0,01 \dots 0,1$.

Анализ кривых (рис. 3) показал, что с уменьшением \bar{h}_s критические напряжения $\bar{\sigma}_{cr,x}$ заметно увеличиваются, что благоприятно сказывается на работе полого элемента; например, при $k_p = 0,8$ и значениях $\bar{h}_s = 0,04$ и $\bar{h}_s = 0,06$ напряжения соответственно будут: $\bar{\sigma}_{cr,x} = 0,2051$; $\bar{\sigma}_{cr,x} = 0,4613$. Разница составляет 55%. Полученное уравнение регрессии рекомендуется использовать при определении критических напряжений при заданном соотношении \bar{h}_s .

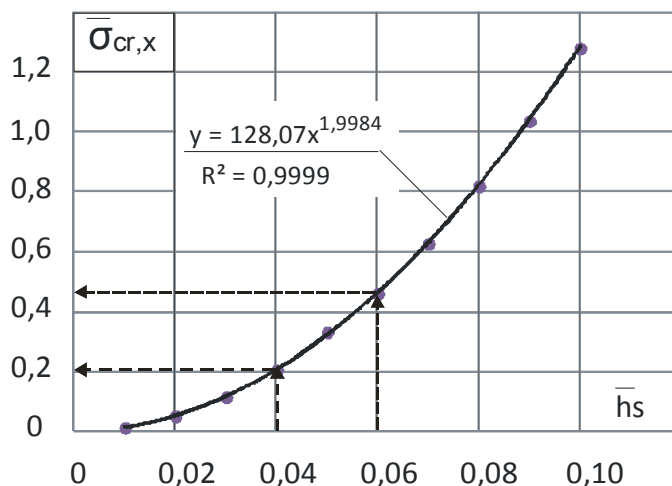


Рис. 3. – Зависимость « $\bar{h}_s - \bar{\sigma}_{cr,x}$ »

По данному графику можно анализировать изменение напряжений в зависимости от соотношения ширины и длины полос, из которых формируется стержневой полый элемент.

4. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЕВОГО ЭЛЕМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Пример 2. Требуется найти критические напряжения при переменном коэффициенте формообразования (раздутия) $k_p = 0,1 \dots 1,0$ и при $\bar{h}_s = 0,01 - 0,1$. Исходные данные см. пример 1.

Анализ графиков (рис.4) показал:

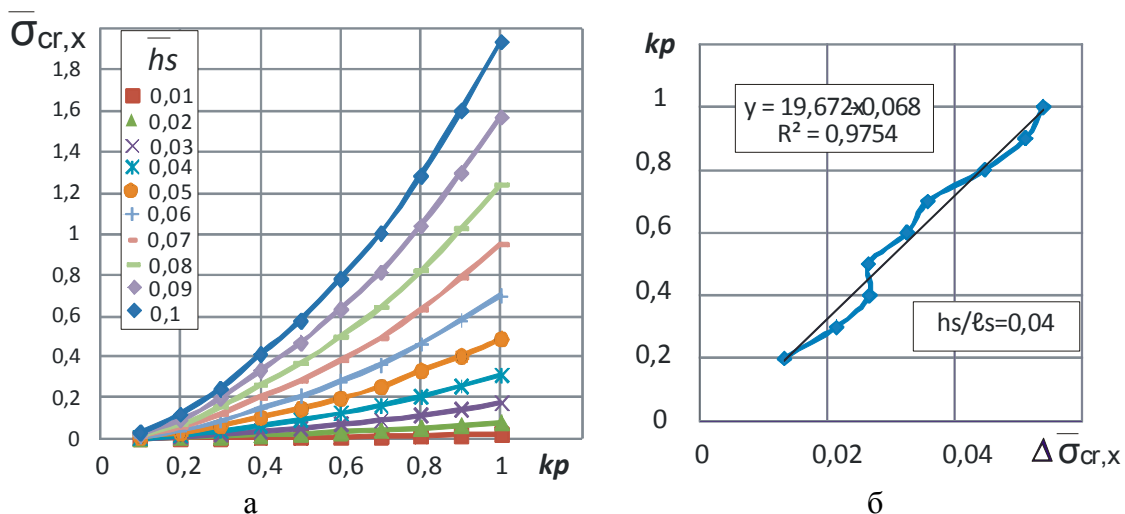


Рис. 4. – Зависимость « $k_p - \bar{\sigma}_{cr,x}$ »

– с увеличением условной ширины стальных полос \bar{h}_s при всех коэффициентах раздутия критические напряжения $\bar{\sigma}_{cr,x}$ увеличиваются, что свидетельствует о повышении устойчивости стержневого элемента относительно оси x-x;

– приращения напряжений $\Delta \bar{\sigma}_{cr,x}$ с увеличением коэффициента раздутия возрастают; все графики имеют степенную зависимость с высокой степенью точности (0,99); причем все приращения изменяются по линейной зависимости, например при $\bar{h}_s = 0,04$.

5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНО ОСЕЙ X И Y

Пример 3. Требуется провести анализ изменения критических напряжений относительно осей x-x и y-y. Исходные данные см. пример 1. Коэффициент раздутия стержневого элемента $k_p = 0,1 \dots 1$.

На рисунке 5 представлены результаты расчета критических напряжений относительно осей x-x и y-y; расчет велся по программе ВЕТА; из составленной номограммы четко видно:

– с увеличением коэффициента раздутия критические напряжения относительно оси x-x увеличиваются, а критические напряжения относительно оси y-y заметно уменьшаются;

– с увеличением размеров полого элемента наблюдается перераспределение напряжений; при $k_p = 0,9-1$ напряжения оси x и оси y сильно сближаются; как показал натурный эксперимент [5] прочный и устойчивый полый элемент образуется при $k_p = 0,7-0,9$; при этом $h_2 > h_1$; критические напряжения относительно оси y-y всегда будут большими, чем относительно оси x-x, что подтверждают данные графиков.

– при коэффициенте раздутия $k_p = 0,8$ напряжения $\bar{\sigma}_{cr,y}$ в 1,5-2 раза больше, чем $\bar{\sigma}_{cr,x}$ при всех значениях k_p и \bar{h}_s .

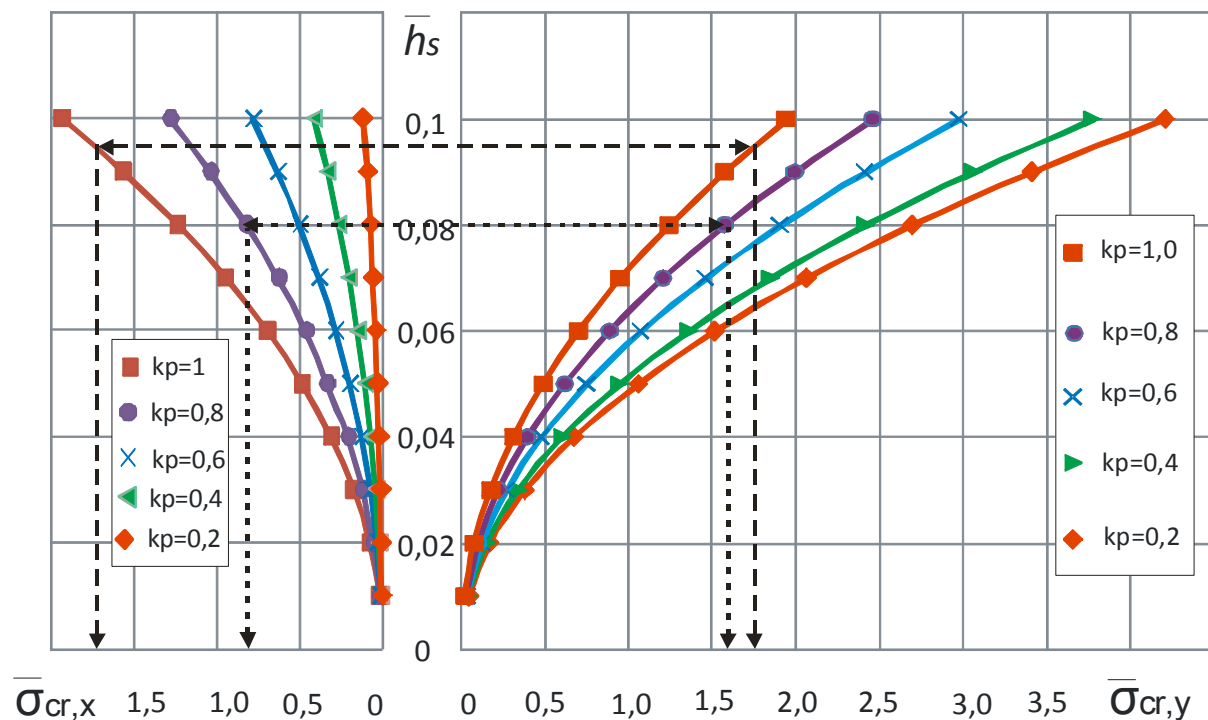


Рис. 5. – Зависимость « $\bar{h}_s - \bar{\sigma}_{cr,x} - \bar{\sigma}_{cr,y}$ »

Представленная номограмма позволяет сравнить величины критических напряжений относительно двух осей при разных коэффициентах раздутия и при различных размерах (ширине и длине) полос из которых создается стержневой элемент.

ВЫВОДЫ

В статье рассмотрена устойчивость стержневого элемента полого поперечного сечения на центральное сжатие. Получены выражения для определения критических напряжений стержневых элементов, из которых собирается сборная цилиндрическая емкость, предназначенная для хранения различных веществ объектов атомной энергетики. Анализ выполненных автором расчетов показал:

– с увеличением условной ширины стальных полос $\overline{h_s}$ при всех коэффициентах раздутия k_p критические напряжения $\overline{\sigma}_{cr,x}$ увеличиваются, то есть устойчивость полого стержневого элемента существенно повышается;

– изменение критических напряжений происходит при увеличении коэффициента раздутия; при этом критические напряжения относительно оси $x-x$ увеличиваются с увеличением коэффициента раздутия, а критические напряжения относительно оси $y-y$ заметно уменьшаются; при коэффициенте раздутия $k_p = 1$ напряжения равны при всех значениях $\overline{h_s}$.

– представленная номограмма позволяет провести анализ устойчивости стержневого элемента при различных его конструктивных параметрах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ращепкина, С.А. К вопросу технологии производства новых металлических конструкций [Текст] / С.А. Ращепкина // Вестник МГСУ. – 2009. – Спецвыпуск. – №3. – С. 147–150.
2. Ращепкина, С.А. К вопросу определения параметров формообразования мини-оболочек металлических емкостей [Текст] / С.А. Ращепкина // Вестник гражданских инженеров. – Санкт-Петербург, 2010. – №2. – С. 54–60.
3. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни. Принципы построения технической теории оболочек. Избранные труды. Т. 3. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 507 с.
4. Ращепкина, С.А. и др. Малогабаритные элеваторы из легких металлических конструкций повышенной транспортабельности [Текст] / С.А. Ращепкина, А.П. Денисова. – Саратов: СГТУ, 2002. – 196 с.
5. Ращепкина, С.А. и др. Инновационная технология XXI века – создание и монтаж металлических ребристых емкостей [Текст] / С.А. Ращепкина, А.С. Артемьева, О.А. Борисенк. Коллективная монография: Книга 2. "Архитектура. Строительство. Инженерные системы". – Новосибирск: ООО «СИБПРИНТ», 2012. – Гл.6. – С. 148–172.
6. Ращепкина, С.А. и др. Распределение напряжений в ребристой емкости для хранения различных веществ АЭС [Текст] / С.А. Ращепкина, Л.В. Ботова // Материалы X Международной науч.-практ. конф. «Безопасность ядерной энергетики». – Волгодонск: ВИТИ НИЯУ МИФИ. 2014. – С. 30-32.

REFERENCES

- [1] Rashchepkina S.A. K voprosu tekhnologii proizvodstva novykh metallicheskih konstruksiy [Technology of production of new metal structures]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009, Spetsvypusk [Special issue], №3, ISSN 1997-0935, pp. 147–150 (in Russian).
- [2] Rashchepkina S.A. K voprosu opredeleniya parametrov formoobrazovaniya mini-obolochek metallicheskih emkostey [To the question of determining the parameters forming a shell of metal containers]. Bulletin of civil engineers. St. Petersburg, 2010, No. 2, ISSN 1999-5571, pp. 54-60 (in Russian).

- [3] Vlasov V.Z. Tonkostennyye uprugie sterzhni. Printsipy postroeniya tekhnicheskoy teorii obolochek [Thin-walled elastic rods. Principles of the technical theory of shells]. Izbrannyye trudy [Selected works]. Vol. 3. M. Pub. Izdatelstvo AN SSSR [USSR Academy of Sciences Publishing House]. 1963, 507 p. (in Russian).
- [4] Rashchepkina S.A., Denisova A.P. Malogabaritnyye elevatory iz legkikh metallicheskih konstruksiy povyshennoy transportabelnosti [Small elevators made of light metal constructions increased transportability]. Saratov. Pub. SGTU [SSTU], 2002, ISBN 5-7433-1012-2, 196 p. (in Russian).
- [5] Rashchepkina S.A., Artemiev A.S., Borisenko A.O. etc. Innovatsionnaya tekhnologiya XXI veka – sozhdanie i montazh metallicheskih rebristykh emkostey [The Innovative technology of the XXI century – the creation and installation of ribbed metal containers]. Kniga 2 [Book 2]. Arkhitektura. Stroitelstvo. Inzhenernyye sistemy [Architecture. Construction. Engineering systems]. Novosibirsk. Pub. OOO "SIBPRINT" [LLC "SIB PRINT"], 2012, Glava 6 [Chapter 6], ISBN 978-5-94301-352-2, pp. 148–172 (in Russian).
- [6] Rashchepkina S.A., Botova L.V. Raspredelenie napryazheniy v rebristoy emkosti dlya khraneniya razlichnykh veshchestv AES [The stress Distribution in corrugated containers for storage of various substances NPP]. Materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Bezopasnost yadernoy energetiki» [Mater. X Intern. scientific.-practical. conf. "Nuclear energy safety"]. Volgodonsk. Pub. VITI NIYAU MIPHI [VETI NRNU MEPhI], 2014, ISBN 978-5-9905145-3-9, pp. 30–32 (in Russian).

Stability of Steel Cylindrical Shell Made of Prefabricated Elements

S.A. Rashchepkina

*Balakovo engineering and technological institute the branch of Federal state autonomous educational institution of higher professional education "National Research Nuclear University "MEPhI",
140 Chapaeva St., Balakovo, Saratov region, Russia, 413800
e-mail: Rashh2008@mail.ru*

Abstract – The paper proposes a capacity of a full cross-section of core elements is intended for of various nuclear material storage. The stability of the bar element to a central compression is considered. Expressions to determine the critical stress beam elements are obtained. It is shown that the variation of the critical stress occurs when the coefficient of deformation of strip blanks during the creation of the hollow member is increased. Thus the critical voltages relative to the x-axis increase with the blow-up ratio, the critical voltages relative to the y-axis significantly reduce. Nomogram showing the variation of the critical stress in the direction of the central axes is provided.

Keywords: NPP reconstruction, metal, ribbed shell, the hollow element, calculation, stability.