

Расчет стенки водонапорной башни в виде цилиндрического резервуара на прочность и устойчивость

С.В. Скачков, С.В. Шуцкий

Донской государственный технический университет

Аннотация: Рассматривается расчет водонапорной башни, конструкции Рожновского, в виде сварной листовой конструкции, конструктивно состоящей из емкости цилиндрической формы с коническими днищем и крышей и цилиндрической опоры. Выполнено создание конечно-элементной расчетной модели и определение напряжений в элементах башни с учетом различных особенностей проектирования, монтажа и эксплуатации сооружения. Рассматриваются вопросы местной устойчивости стенки в стыках цилиндрических и конических частей. Обоснована необходимость устройства ребер жесткости в конусной части по меридиональным направлениям и в местах стыка - кольцевых ребер.

Ключевые слова: Башня, листовая конструкция, резервуар, устойчивость, напряжения

Рассмотрены действия нагрузок на конструкции водонапорной башни, состоящей из резервуара и опорной конструкции цилиндрической формы. Конструкция башни представляют собой сварную листовую конструкцию, конструктивно состоящей из емкости цилиндрической формы с коническими днищем и крышей и цилиндрической опоры, заполняемой водой (рис. 1).

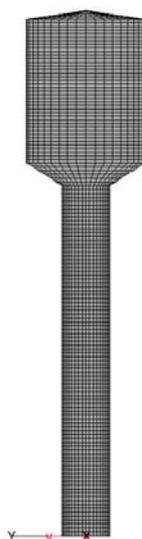


Рис. 1. Схема башни

Для расчета стенки резервуара на прочность, устойчивость может быть использована безмоментная теория[2]. Определение напряжений в стенках выполнено методом конечных элементов, который позволяет оценить уровни напряжения в тонкостенчатых элементах [3]. В стенке резервуара возникают меридиональные напряжения σ_1 и кольцевые напряжения σ_2 . Меридиональные напряжения σ_1 возникают от вертикальных нагрузок - собственного веса, снега, оборудования, ветрового отсоса на кровле. Кольцевые напряжения σ_2 возникают от горизонтального гидростатического давления жидкости и ветрового напора. Наибольшие напряжения в стенке резервуара возникают от гидростатического давления воды. Ветровая нагрузка в расчете стенки резервуара учтена в комбинациях с наполненной и не наполненной водой башней.

Расчет на прочность по меридиональным и кольцевым напряжениям:

$$\sigma_{1,2} \leq R_{wy} \cdot \gamma_{c1}$$

Проверка по приведенным напряжениям:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2} \leq R_{wy} \cdot \gamma_{c1}$$

Полученные по результатам расчета распределения меридиональных и кольцевых напряжений в стенке показаны на рис. 3.

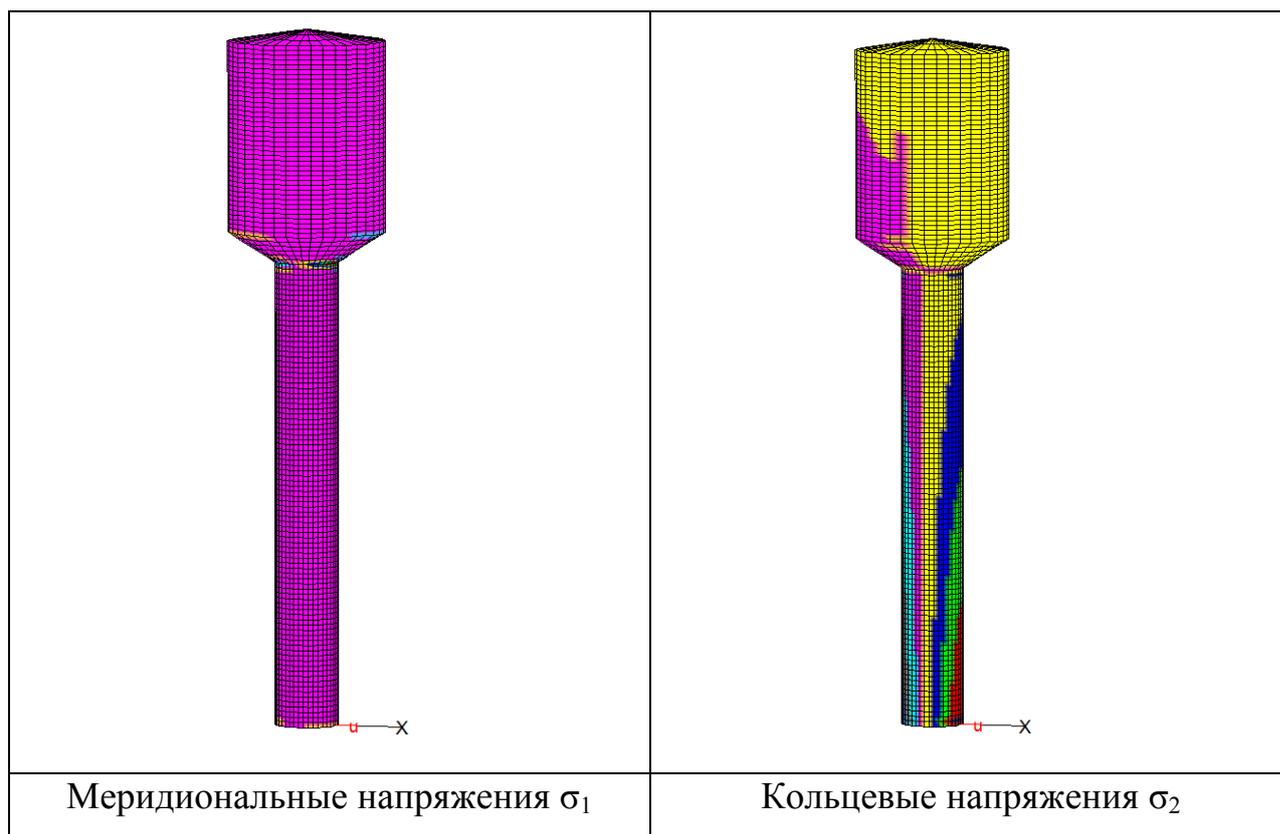


Рис.3. Распределение напряжений

Для расчета стенки резервуара на устойчивость сравниваются расчетные напряжения (меридиональные или кольцевые) с критическими напряжениями.

Расчет на устойчивость по меридиональным и кольцевым напряжениям:

$$\sigma_{1,2} \leq \gamma_{k2} \cdot \sigma_{cr,1,2}$$

Учет совместного действия кольцевых и меридиональных напряжений на устойчивость стенки выполняется по формуле:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}} \leq \gamma_{c2}$$

Критические напряжения характеризуют потерю устойчивости стенки. В зонах действия краевых эффектов происходит выпучивание стенки, потеря местной устойчивости. Наибольшие сжимающие напряжения приводящие к потере устойчивости наблюдаются в пустом резервуаре. Напряжения σ_1 в меридиональном направлении возникают от веса кровли с оборудованием, собственного веса конструкций, снеговой нагрузки, ветрового отсоса на кровле и вакуума. Кольцевые напряжения σ_2 возникают от ветрового напора и вакуума. Проверка устойчивости производится в месте стыка основания стенки резервуара и конического перехода.

В местах соединения цилиндра резервуара с коническим переходом к опоре башни стенки не могут свободно деформироваться, появляются линейные и угловые перемещения. Деформации вызваны действием радиальных нагрузок и меридиональными краевыми моментами в стыках стенок. Поскольку сопряжение стенок резервуара и конического перехода предусмотрено под углом возникают изгибающие моменты в меридиональной плоскости.

Особенностью напряженного состояния материала стенок, вызванного краевыми моментами и силами, является изменение значений вызываемых ими сил, моментов, напряжений и деформаций по мере удаления от края по быстро затухающей знакопеременной, волнообразной кривой, характеризуемой уравнением вида[1].

$$y = A \cdot e^{-\beta x} (\sin \beta x \pm \cos \beta x)$$

Из уравнения следует, что изгибающие напряжения, вызванные краевыми силами и моментами, имеют местный характер и оказывают влияние только в непосредственной близости от плоскости приложения краевых сил и моментов (рис.4).

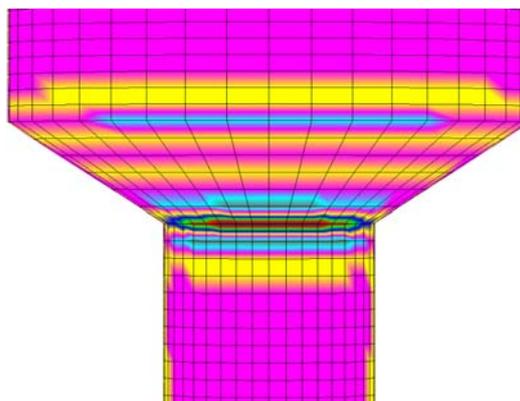


Рис. 4. Изгибающие напряжения в местах соединения стенок цилиндрической и конусной частей

Расчеты с использованием конечно-элементной модели позволили определить значения напряжений. При этом рассматриваются вопросы местной устойчивости стенки в стыках цилиндрических и конических частей. Появление изгибных деформаций (рис. 5) в тонкой стенке конической части может привести к потере местной устойчивости при действии меридиональных и кольцевых напряжений. Изменение геометрии стенки в местах стыка приводит в свою очередь к полному исчерпанию несущей способности конструкции (рис.6).

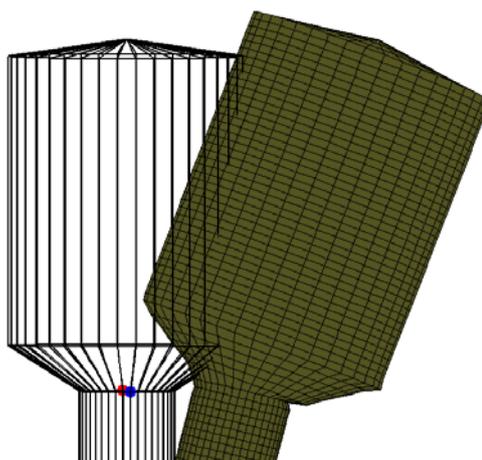


Рис. 5. Деформации стенки от внешних нагрузок (значения увеличены в 10 раз)



Рис.6. Обрушение башни Рожновского вследствие потери местной устойчивости стенки

Для определения критических напряжений рассмотрена усеченная коническая оболочка, имеющая подкрепления в виде ребер жесткости. Шаг ребер жесткости принимается по расчету, жесткость стенки на изгиб по

направлению оболочки не учитывается, поскольку она во много раз меньше жесткости ребер [4]. Критическое давление на стенку конусной оболочки можно определить по формуле вида:

$$P_{cr} := \frac{E \cdot \cos(\alpha)}{b + n^2 \cdot c} \cdot \left[\frac{I \cdot \cos(\alpha)}{r l^3 \cdot l l} \cdot (n^4 + d \cdot n^2 + e) + f \cdot \frac{t}{2(1 - \mu^2) \cdot r l} \cdot \frac{n^2 + h}{(n^2 \cdot g + k) \cdot (n^2 + m) - n^2 \cdot s} \right]$$

Получены зависимости изменения критического давления от отношения шага кольцевых ребер жесткости к высоте конуса (рис. 7.).

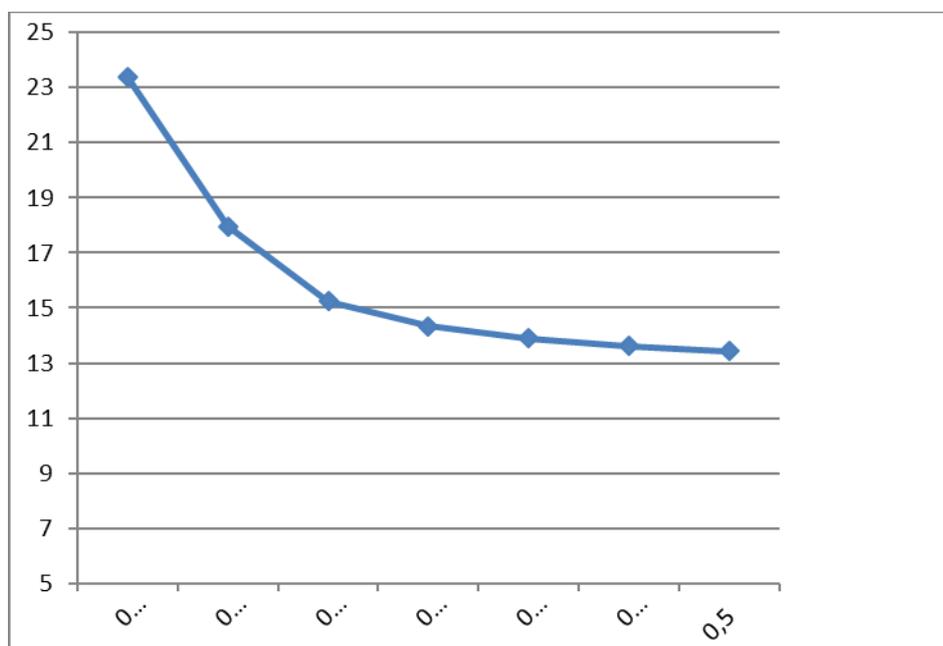


Рис. 7. График зависимости напряжений от относительного шага ребер жесткости

Расчеты показали необходимость устройства ребер жесткости в конусной части по меридиональным направлениям и в местах стыка - кольцевых ребер. Деформации стенок при этом значительно снижены, потери устойчивости не происходит.

Литература

1. Виноградов С.Н. Конструирование и расчет элементов тонкостенных сосудов: Учеб.по-собие / С. Н. Виноградов, К. В. Таранцев. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 136 с.: 44 ил., 3 табл., библиогр. 22 назв.
 2. Жилин П.А. Прикладная механика. Основы теории оболочек. СПб: Изд- во СПбГПУ. 2006. 167 с.
 3. Власов В.З. Избранные труды. Общая теория оболочек (том 1). Москва: издательство академии наук СССР, 1962 г. - 528 с.
 4. Филин А.П. Элементы теории оболочек: Монография. – Л.:Стройиздат, 1975. – 256 с.
 5. Амосов А.А. Техническая теория тонких упругих оболочек. Монография. Амосов А.А. – М.: АСВ, 2009, – 332 с.
 - 6.Скачков С.В. Особенности автоматизированных расчетов элементов из тонкостенных стальных профилей. Интернет-журнал Науковедение №3(12), 2012-6с.
 7. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных здания и сооружений. Расчетно-теоретический. В двух книгах. Кн. 2. Под ред. А.А. Уманского. Изд. 2-е. перераб. и доп. М., Стройиздат, 1973.- 416с.
 8. Бандурин М.А. Особенности технической диагностики длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений // Инженерный вестник Дона, 2012, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/861
 9. Бандурин М.А. Проблемы оценки остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений. Инженерный вестник Дона, 2012, №3. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/891.
 10. Hickman A.R. Carriers cut back coverage for construction defects / American Agent & Broker. 2003. Т. 75. № 7. p. 24.
-



11. Atkinson Andrew R. The role of human error in construction defects / Structural Survey. 1999. V. 17. № 4. pp. 231-236

References

1. Vinogradov S.N. Konstruirovaniye i raschet elementov tonkostennykh sosudov [Designing and calculation of elements of thin-walled vessels]: Ucheb.po-sobie. Penza: Izd.vo Penz. gos. Un.ta, 2004.136 p.
2. Zhilin P.A. Prikladnaya mehanika. Osnovy teorii obolochek. [Fundamentals of the theory of shells]. SPb: Izdatelstvo SPbGPU. 2006. 167p.
3. Vlasov V.Z. Izbrannye trudy. Obshchaya teoriya obolochek (tom 1) [General theory of shells (volume 1)]. Moskva: izdatel'stvo akademii nauk SSSR, 1962 g. 528p.
4. Filin A.P. Jelementy teorii obolochek [Elements of the theory of shells]: Monografija. L.:Strojizdat, 1975, 256 p.
5. Amosov A.A. Tehnicheskaja teoriya tonkih uprugih obolochek. [Technical theory of thin elastic shells]: Monografija; M.: ASV, 2009, 332 p.
6. Skachkov S.V. Internet zhurnal Naukovedenie №3 (12), 2012.6 p.
7. Spravochnik proektirovshchika promyshlennykh, zhilykh i obshchestvennykh zdaniya i sooruzheniy. Raschetno-teoreticheskiy [Directory of designer industrial, residential and public buildings. The calculated theoretically.]. V dvukh knigakh. Kn. 2. Pod red. A.A. Umanskogo. Izd. 2e. pererab. i dop. M., Stroyizdat, 1973. 416p.
8. Bandurin M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/861.
9. Bandurin M.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012. №3. ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/891.
10. Hickman A.R. 2003. V. 75. № 7. p. 24.
11. Atkinson Andrew R.1999. V. 17. № 4. pp. 231-236