DOI: 10.17117/na.2016.08.01.189

<http://ucom.ru/doc/na.2016.08.01.189.pdf>

Поступила (Received): 24.08.2016

Дедов Н.И., Адеянов И.Е., Исуткина В.Н. Анализ напряженно-деформированного состояния резервуаров в зонах сопряжения оболочек

Dedov N.I., Adeyanov I.E., Isutkina V.N.
Analysis of stress-strain state reservoirs in areas of coupling shells

При проектировании нефтехимического оборудования применяются оболочки различных форм. В зонах соединения оболочек различной жесткости возникают краевые силы и моменты, вызывающие дополнительные напряжения и деформаций для расчета которых необходимо использовать моментную теорию оболочек. Существующие теоретические методы решения краевой задачи для эллипсоидальных и торосферических оболочек являются сложными и трудоемкими при инженерных расчетах. Наиболее полный анализ напряжений краевого эффекта может быть выполнен с использованием метода конечных элементов, реализованного в пакете программ ANSYS. Приведены результаты расчета напряжений и деформаций для различных форм днищ

Ключевые слова: краевой эффект, оболочки, напряжения, деформации

Various forms of shells apply in petrochemical equipment design. In areas compounds the shells of varying stiffness occur boundary forces and moments, causing additional stress and strain for the calculation of which should be used bending theory of shells. The existing theoretical methods for solving boundary value problems for ellipsoidal and torosferical shells are complex and time-consuming in engineering calculations. The most complete analysis of the edge effect of the stress can be performed using the finite element method, implemented in the ANSYS software package. The results of calculation of stress and strain for various forms of bottoms were obtained

Key words: edge effect, shells, stresses, strains

Дедов Николай Иванович

Кандидат технических наук, профессор
Самарский государственный технический университет
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Dedov Nikolai Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Professor
Samara state technical university
Samara, Molodogvardeiskaya st., 244

Адеянов Игорь Евгеньевич

Кандидат технических наук, доцент
Самарский государственный технический университет
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Adeyanov Igor Evgenevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Samara state technical university
Samara, Molodogvardeiskaya st., 244

Исуткина Вера Николаевна

Кандидат физико-математических наук, доцент
Самарский государственный технический университет
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Isutkina Vera Nikolaevna

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor
Samara state technical university
Samara, Molodogvardeiskaya st., 244

Конструкция цилиндрических резервуаров, нагруженных внутренним давлением, включает осесимметричные днища, форма и размеры которых выбираются на основе расчетов на прочность, жесткость и устойчивость с учетом технологических требований. Наиболее дешевыми и простыми в изготовлении являются плоские днища, но при больших диаметрах резервуаров и больших давлениях они получаются очень тяжелыми и толстыми. Высокие напряжения изгиба возникают не только в конструкции плоского днища, но и в стыке его с цилиндром. Поэтому они применяются при малых давлениях или небольших диаметрах. Тонкостенные осесимметричные конструкции, работающие на внутреннее давление, имеют минимальный вес при равномерном распределении напряжений в материале по толщине стенки. Мембранное напряженное состояние обеспечивается в оболочечных конструкциях, имеющих плавное очертание форм и плавное изменение толщин. Днища, имеющие выпуклую форму вращения, обеспечивают благоприятное распределение напряжений в конструкции и позволяют минимизировать изгибные напряжения в стыке днища с цилиндром. Напряженное состояние от распределенных по поверхности нагрузок определяют по уравнениям мембранной (безмоментной) теории оболочек. Результаты расчетов, полученные по мембранной теории, являются достаточно точными для проведения инженерных расчетов в процессе проектирования конструкций резервуаров. Краевые силы и моменты возникают в местах закрепления, резкого изменения контура, толщины или материала в соединении оболочек [1, 2]. Напряжения и деформации от действия краевых сил и моментов могут достигать высоких значений, что приводит к необходимости увеличения толщин оболочек. Напряженное состояние от краевых сил и моментов исследуется с помощью уравнений моментной теории оболочек. Краевые напряжения и деформации оказывают влияние на материал в локальных зонах, расположенных в местах приложения краевых сил и моментов.

Наиболее широкое применение получили сферические, эллиптические и торосферические (коробовые) днища. Эллиптические и торосферические днища имеют цилиндрические отбортовки для того, чтобы вывести сварной шов стыка за пределы краевой зоны.

Резервуар, состоящий из цилиндрической оболочки и двух днищ, находится под действием равномерного давления. В соединении днища с цилиндрической оболочкой возникают самоуравновешенные, равные по величине и обратные по направлению краевые силы и моменты.

В соединении днища и цилиндрической оболочки возникают краевые силы и моменты. Обозначим: p – внутреннее давление, Q_{13} – погонная краевая сила, возникающая в стыке днища с цилиндром, M_{11} – погонный меридиональный краевой момент, возникающий в стыке днища с цилиндром, M_{22} – погонный кольцевой краевой момент, N – погонная меридиональная сила. В результате совместного действия внутреннего давления, краевых сил и моментов радиальные и угловые перемещения краев днища и цилиндра будут одинаковыми. Уравнения совместности радиальных и угловых перемещений запишем в виде

$$\Delta_{\text{дн}} = \Delta_{\text{ц}}, \theta_{\text{дн}} = \theta_{\text{ц}},$$

где $\Delta_{\text{дн}}$ – радиальное перемещение края днища, $\Delta_{\text{ц}}$ – радиальное перемещение края цилиндра, $\theta_{\text{дн}}$ – угловое перемещение края днища, $\theta_{\text{ц}}$ – угловое перемещение края цилиндра. В результате действия краевых сил и моментов оболочки в местах соединения изменяют форму и возникают дополнительные напряжения. Для уменьшения влияния краевого эффекта на прочность соединения цилиндра с днищем необходимо обеспечить плавное их сопряжение за счет постепенного изменения кривизны очертания днищ. В точке стыка цилиндра с днищем касательная к контуру днища должна совпадать с образующей цилиндра.

Для полусферического днища и цилиндрической оболочки получены достаточно точные простые теоретические решения краевой задачи. Для эллипсоидальных и торосферических днищ точные теоретические решения оказываются сложными, что затрудняет их использование для проектирования тонкостенных резервуаров.

Наиболее полный анализ напряжений в зоне краевого эффекта может быть выполнен с использованием метода конечных элементов, реализованного в пакете программ ANSYS [3, 4].

Для решения данной задачи был использован осесимметричный конечный элемент *Shell208* с указанием толщины с помощью которого получена конечно-элементная модель конструкции. При создании конечно-элементной модели использовалось разбиение днища и цилиндрической оболочки со средней длиной 5 мм.

Резервуар нагружен внутренним давлением $p = 0.5$ МПа.

Материал листов сталь 09Г2С ГОСТ 5520-79 с механическими свойствами: модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, предел текучести $\sigma_T = 345$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 490$ МПа, относительное удлинение $\delta = 21\%$. При расчете в упругопластической области диаграмма растяжения материала принималась билинейной с изотропным упрочнением. В виду симметрии исследуемой конструкции и нагрузки рассматривалась ее половина.

Резервуар с полусферическим днищем.

Геометрические размеры: толщина полусферического днища 5 мм, радиус полусферического днища 1500 мм, толщина цилиндрической оболочки 5 мм, радиус цилиндрической оболочки 1500 мм, длина цилиндрической оболочки 1500 мм.

Конечно-элементная модель верхней части резервуара с полусферическим днищем, деформированная и недеформированная формы образующей резервуара показаны на рис. 1.

Результаты расчета наибольших главных напряжений и эквивалентных по Мизесу напряжений показаны на рис. 2, 3, краевых моментов и краевых сил – на рис. 4, 5, 6 соответственно.

Рис. 1. Деформированная и недеформированная формы образующей резервуара с полусферическим днищем, находящегося под действием внутреннего давления

Рис. 2. Зависимость между расстоянием от стыка полусферической и цилиндрической частей резервуара и окружным главным напряжением

Рис. 3. Зависимость между расстоянием от стыка полусферической и цилиндрической частей резервуара и эквивалентным напряжением по Мизесу

Рис. 4. Зависимость между расстоянием от стыка полусферической и цилиндрической частей резервуара и меридиональным изгибающим моментом M_{11}

Рис. 5. Зависимость между расстоянием от стыка полусферической и цилиндрической частей резервуара, и кольцевым изгибающим моментом M_{22}

Рис. 6. Зависимость между расстоянием от стыка полусферической и цилиндрической частей резервуара, и поперечной силой Q_{13}

Наибольшие главные напряжения в зоне краевого эффекта на цилиндрической оболочке составляют 154 МПа, что превышает мембранные на 2.67%. Дополнительные напряжения в краевой зоне вызываются краевыми силами, так как краевые моменты в стыке полусферического днища с цилиндром, в случае одинаковых толщин, равны нулю.

Резервуар с эллиптическим дном.

Геометрические размеры: толщина эллиптического дна 5 мм, большая ось эллиптического дна 3000 мм, малая ось эллиптического дна 1500 мм, толщина цилиндрической оболочки 5 мм, радиус цилиндрической оболочки 1500 мм, длина цилиндрической оболочки 1500 мм.

Конечно-элементная модель верхней части резервуара с эллиптическим дном, деформированная и недеформированная формы образующей резервуара показаны на рис. 7.

Результаты расчета наибольших главных напряжений и эквивалентных по Мизесу напряжений показаны на рис. 8, 9, краевых моментов и краевых сил – на рис. 10, 11, 12 соответственно.

Рис. 7. Деформированная и недеформированная формы образующей резервуара с эллиптическим дном, находящегося под действием внутреннего давления

Рис. 8. Зависимость между расстоянием от стыка эллиптической и цилиндрической частей резервуара и окружным главным напряжением

Рис. 9. Зависимость между расстоянием от стыка эллиптической и цилиндрической частей резервуара и эквивалентным напряжением по Мизесу

Рис. 10. Зависимость между расстоянием от стыка эллиптической и цилиндрической частей резервуара, и меридиональным изгибающим моментом M_{11}

Рис. 11. Зависимость между расстоянием от стыка эллиптической и цилиндрической частей резервуара, и кольцевым изгибающим моментом M_{22}

Рис. 12. Зависимость между расстоянием от стыка эллиптической и цилиндрической частей резервуара, и поперечной силой Q_{13}

Наибольшие главные напряжения в зоне краевого эффекта на эллиптическом днище составляют 171.4 МПа, а эквивалентные по Мизесу напряжения составляют 227.5 МПа, что превышает мембранные на 13.3%. Дополнительные напряжения в краевой зоне вызываются краевыми силами, так как краевые моменты в стыке эллиптического днища с цилиндром, в случае одинаковых толщин, равны нулю. Краевые силы в случае эллиптического днища увеличились в 3.76 раза по сравнению со сферическим днищем.

Резервуар с торосферическим днищем.

Геометрические размеры: толщина торосферического днища 5 мм, радиус тора 285 мм, радиус сферической части днища 2100 мм, толщина цилиндрической оболочки 5 мм, радиус цилиндрической оболочки 1500 мм, длина цилиндрической оболочки 1500 мм.

Конечно-элементная модель верхней части резервуара со торосферическим днищем, деформированная и недеформированная формы образующей резервуара показаны на рис. 13.

Результаты расчета наибольших главных напряжений и эквивалентных по Мизесу напряжений показаны на рис. 14, 15, краевых моментов и краевых сил – на рис. 16, 17, 18 соответственно.

Рис. 13. Деформированная и недеформированная формы образующей резервуара с торосферическим днищем, находящегося под действием внутреннего давления

Рис. 14. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей резервуара и окружным главным напряжением

Рис. 15. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей резервуара и эквивалентным напряжением по Мизесу

Рис. 16. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей резервуара, и меридиональным изгибающим моментом M_{11}

Рис. 17. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей резервуара, и кольцевым изгибающим моментом M_{22}

Рис. 18. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей резервуара, и поперечной силой Q_{13}

Наибольшие главные напряжения в зоне краевого эффекта в стыке сферической части с торовой составляют 221 МПа, а эквивалентные по Мизесу составляют 330 МПа, что превышает значения краевых напряжений в полусферических и эллипсоидальных днищах. Краевые моменты в стыках сферической части с торовой, торовой части с цилиндром, в случае одинаковых толщин, равны нулю. Краевые силы для торосферического днища в стыке сферической части с торовой увеличились в 8.25 раза по сравнению со сферическим днищем.

При расчете торосферического днища необходимо учитывать краевые эффекты в двух стыках: в стыке сферической части днища с торовой и в стыке торовой части днища с цилиндром.

Сравнительный анализ результатов расчета резервуаров с различными по форме днищами показывает, что при одинаковых толщинах днищ и цилиндра краевые моменты можно принять равными нулю. Краевые силы в случае эллиптического и торосферического днищ резко возрастают по сравнению с полусферическим днищем.

Список используемых источников:

1. Канторович З.Б. Основы расчета химических машин и аппаратов. М.: Машгиз, 1960. С. 743.
2. Домашнев А.Д. Конструирование и расчет химических аппаратов. М.: Машгиз, 1961. С. 624.
3. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. Справ. пособие. М.: Машиностроение-1, 2004. С. 512.
4. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах. М.: Компьютер Пресс, 2002. С. 224.

© 2016, Дедов Н.И., Адеянов И.Е., Исуткина В.Н.

Анализ напряженно-деформированного состояния резервуаров в зонах сопряжения оболочек

© 2016, Dedov N.I., Adeyanov I.E., Isutkina V.N.

Analysis of stress-strain state reservoirs in areas of coupling shells