

УДК 641.53

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СОСУДОВ С ТОРОКОНИЧЕСКИМИ
И ЭЛЛИПСОКОНИЧЕСКИМИ ДНИЩАМИ***Дедов Н.И., Адеянов И.Е., Исуткина В.Н.**СамГТУ,
г. Самара, Россия
nikolai_dedov@mail.ru*

Некоторые виды нефтехимического оборудования состоят из стальных цилиндрических оболочек с коническими днищами. Конические днища могут быть без отбортовок и тогда в стыке конуса с цилиндром возникают краевые силы и моменты, для восприятия которых необходимо устанавливать шпангоут [1, 2]. В случае сопряжения цилиндрической оболочки с конусом переходным тороидальным или эллипсоидальным участками удастся избежать установки шпангоута и значительно снизить краевые напряжения и деформации. Вдали от зоны сопряжения днища с цилиндром напряжения определяются по формулам безмоментной теории оболочек. В зонах сопряжения расчет необходимо проводить по моментной теории оболочек. Точные решения для тороидальных или эллипсоидальных переходных зон оказываются сложными и трудоемкими для применения в расчетной практике проектирования сосудов внутреннего давления. Для детального анализа напряженно-деформированного состояния воспользуемся наиболее распространенным численным методом решения сложных инженерных задач - методом конечных элементов, реализованном, в частности, в пакете ANSYS [3, 4].

Для решения данной задачи был использован оболочечный осесимметричный конечный элемент *Shell208*, с помощью которого получены конечно-элементные модели сосудов с тороконическими и эллипсоконическими днищами. Применение этого типа элементов позволяет уменьшить размерность задачи по сравнению с другими типами конечных элементов: плоскими осесимметричными, оболочечными и объемными. При создании конечно-элементной модели использовалось разбиение конечными элементами со средним размером 5 мм.

Рассмотрим сосуд, нагруженный внутренним давлением $p = 0.5$ МПа. Толщина цилиндрической оболочки 5 мм, радиус цилиндрической оболочки 1500 мм, длина цилиндрической оболочки 1500 мм.

Материал днищ и цилиндрической оболочки 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 $\delta = 21\%$. Для учета пластических деформаций принималась билинейная модель упругопластического деформирования материала с изотропным упрочнением. Ввиду симметрии исследуемой конструкции и нагрузки при расчете рассматривалась верхняя часть сосуда.

Сосуд, состоящий из цилиндрической оболочки и тороконического днища

Геометрические размеры днища: толщина полусферического днища 5 мм, толщина тора 5 мм, радиус тора 285 мм, высота днища 1477 мм. Конечно-элементная модель верхней части сосуда с тороконическим днищем и деформированная форма сосуда показаны на рис. 1.

Результаты расчета наибольших главных напряжений и эквивалентных напряжений показаны на рис. 2, 3, краевых моментов и краевых сил – на рис. 4, 5, 6 соответственно. Начало координат на рисунках выбрано в стыке цилиндра с переходными зонами. Ось абсцисс считается положительной в направлении от цилиндра к днищу.

Эквивалентные напряжения вычисляются по формуле

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

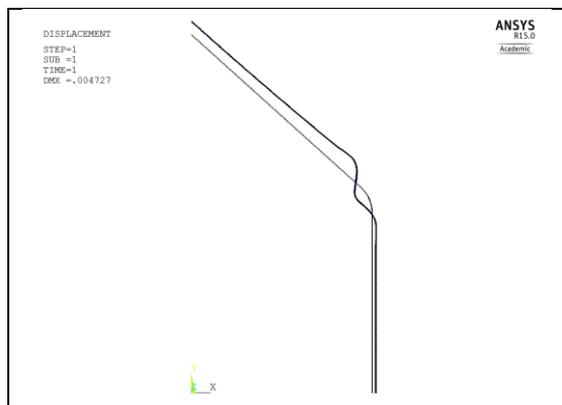


Рис. 1. Деформированная и недеформированная формы образующей сосуда с тороконическим днищем, находящегося под действием внутреннего давления

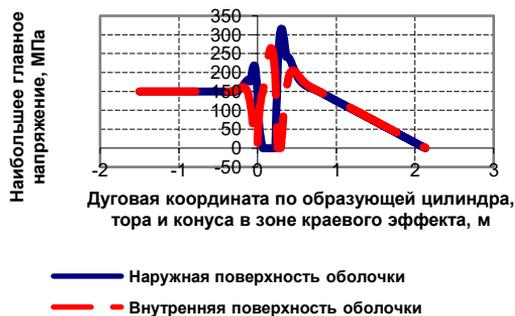


Рис. 2. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей сосуда и наибольшим главным напряжением



Рис. 3. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей сосуда и эквивалентным напряжением



Рис. 4. Зависимость между расстоянием от стыка торовой и цилиндрической частей сосуда, и меридиональным изгибающим моментом M_{11}



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



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

Наибольшие главные напряжения в зоне краевого эффекта в стыке конической части с торовой составляют 312 МПа, а эквивалентные составляют 345 МПа. Краевые моменты в стыках конической части с торовой, торовой части с цилиндром, в случае одинаковых толщин, равны нулю. Краевая сила в стыке тора с цилиндром равна 18700 Н, а в стыке тора с конусом 31800 Н.

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

Сосуд, состоящий из цилиндрической оболочки и эллипсоконического днища

Геометрические размеры днища: толщина эллипсоконического днища 5 мм, большая полуось эллипса 1500 мм, малая полуось эллипса 1098 мм, высота днища 1478 мм. Конечно-элементная модель верхней части сосуда с эллипсоконическим днищем и деформированная форма сосуда показаны на рис. 7.

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

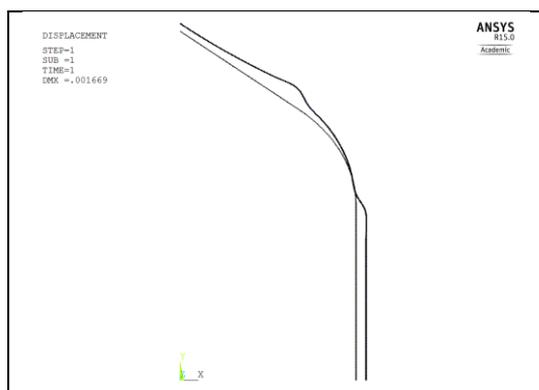


Рис. 7. Деформированная и недеформированная формы образующей сосуда с эллипсоконическим днищем, находящегося под действием внутреннего давления

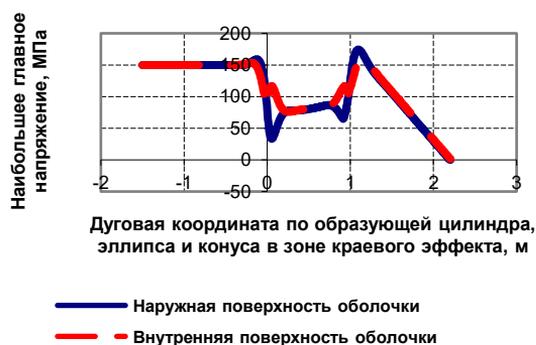


Рис. 8. Зависимость между расстоянием от стыка эллипса с цилиндром и наибольшим главным напряжением



Рис. 9. Зависимость между расстоянием от стыка эллипса с цилиндром и эквивалентным напряжением



Рис. 10. Зависимость между расстоянием от стыка эллипса с цилиндром и меридиональным изгибающим моментом M_{11}



Рис. 11. Зависимость между расстоянием от стыка эллипса с цилиндром и кольцевым изгибающим моментом M_{22}



Рис. 12. Зависимость между расстоянием от стыка эллипса с цилиндром и поперечной силой Q_{13}

Наибольшие главные напряжения в зоне краевого эффекта в стыке эллиптической части с конусной составляют 174 МПа, а эквивалентные составляют 162 МПа. Наибольшие главные напряжения в тороконическом днище превышают наибольшие главные напряжения в эллипсоконическом днище в 1.8 раза, а превышение для эквивалентных напряжений составляет 2.1 раза. Краевые моменты в стыках конической части с торовой, торовой части с цилиндром равны нулю. Краевая сила в стыке эллипса с цилиндром равна 7330 Н, а в стыке эллипса с конусом 5410 Н.

При расчете эллипсоконического днища необходимо учитывать краевые эффекты в двух стыках: в стыке цилиндрической части днища с эллипсной и в стыке эллипсной части днища с конической.

Сравнительный анализ результатов расчета сосудов с тороконическими днищами и эллипсоконическими днищами показывает, что при одинаковых высотах и толщинах днищ краевые моменты можно принять равными нулю. Краевые силы в случае тороконического днища резко возрастают по сравнению с эллипсоконическим днищем.

Проведено исследование связи формы поверхности днища с объемом с помощью коэффициента эффективности формы k , равного отношению площади поверхности днища к объему.

Для тороконического днища коэффициент эффективности формы равен

$$k_{TK} = \frac{S_{TK}}{V_{TK}} = \frac{10.555}{4.059} = 2.60.$$

Для эллипсоконического днища коэффициент эффективности формы равен

$$k_{ЭК} = \frac{S_{ЭК}}{V_{ЭК}} = \frac{12.056}{5.404} = 2.23.$$

Из сравнения двух форм днища для выбранных размеров (днища с одинаковыми толщинами и высотами) видно, что более оптимальным в весовом отношении является эллипсоконическое днище.

Библиографический список:

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.

УДК 342.68

**РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ОБОРУДОВАНИЮ
НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА***Н.Г. Кац, А.И. Шимаров**Самарский государственный технический университет,
г. Самара, Россия
alexandr-shimarov@rambler.ru*

Статья посвящена активизации самостоятельной работы будущих специалистов высшего звена. Рассматривается организация работы студентов на базе специализированного учебно-методического комплекса с точки зрения повышения эффективности образовательного процесса.

В последнее время большое внимание уделяется реализации компетентностного подхода в образовании. Отличием компетенций от традиционных квалификационных требований является то, что оценке подлежат не только усвоенные знания, но и способность находить им применение для решения профессиональных задач. Компетентностный подход в современной системе российского образования требует усиления доли самостоятельной работы студентов, средствами информационных технологий [1, 2].

При этом важно правильно определить объем и структуру содержания учебного материала, выносимого на самостоятельную проработку. Часто самостоятельная работа студента сводится к изучению не рассмотренных на лекциях тем, подготовке рефератов, докладов и др. Однако такой принцип исключает индивидуальные особенности студента, творческий подход и нестандартные решения. В такой модели обучения остаются неучтенными информационная насыщенность современного образовательного пространства, ориентация на личные качества студента, исследовательская и проектировочная направленность его работы. Студент должен быть готов к самостоятельному решению профессиональных задач, поэтому перед ним нужно ставить подобные задачи. Такой подход сможет в итоге ориентировать студентов на формирование компетенций, связанных с постановкой целей, решением задач, планированием, преодолением проблем, усвоением новых знаний и навыков.

С учетом этого авторами разработана технология обучения

бакалавров, основанная на вовлечении студентов в профессиональное самоопределение. В настоящее время она ориентирована на дисциплину – «Химическое сопротивление и защита от коррозии». Технология получила название: «Учебно-методический комплекс для самостоятельной работы студентов» (УМК-с). Вопросы, рассматриваемые в этом комплексе, занимают важное место в программе подготовки бакалавров по направлениям 131000.62 – Нефтегазовое дело; 151000.62 – Технологические машины и оборудование.

Структура УМК-с приведена на рис. 1. В этот комплекс входят: интерактивный учебник по основным разделам дисциплины «Химическое сопротивление и защита от коррозии», учебное пособие по теории решения изобретательских задач (ТРИЗ), учебные анимационные и видеофильмы, домашние задания на базе ТРИЗ, примеры решения задач, модуль тестирования и др.

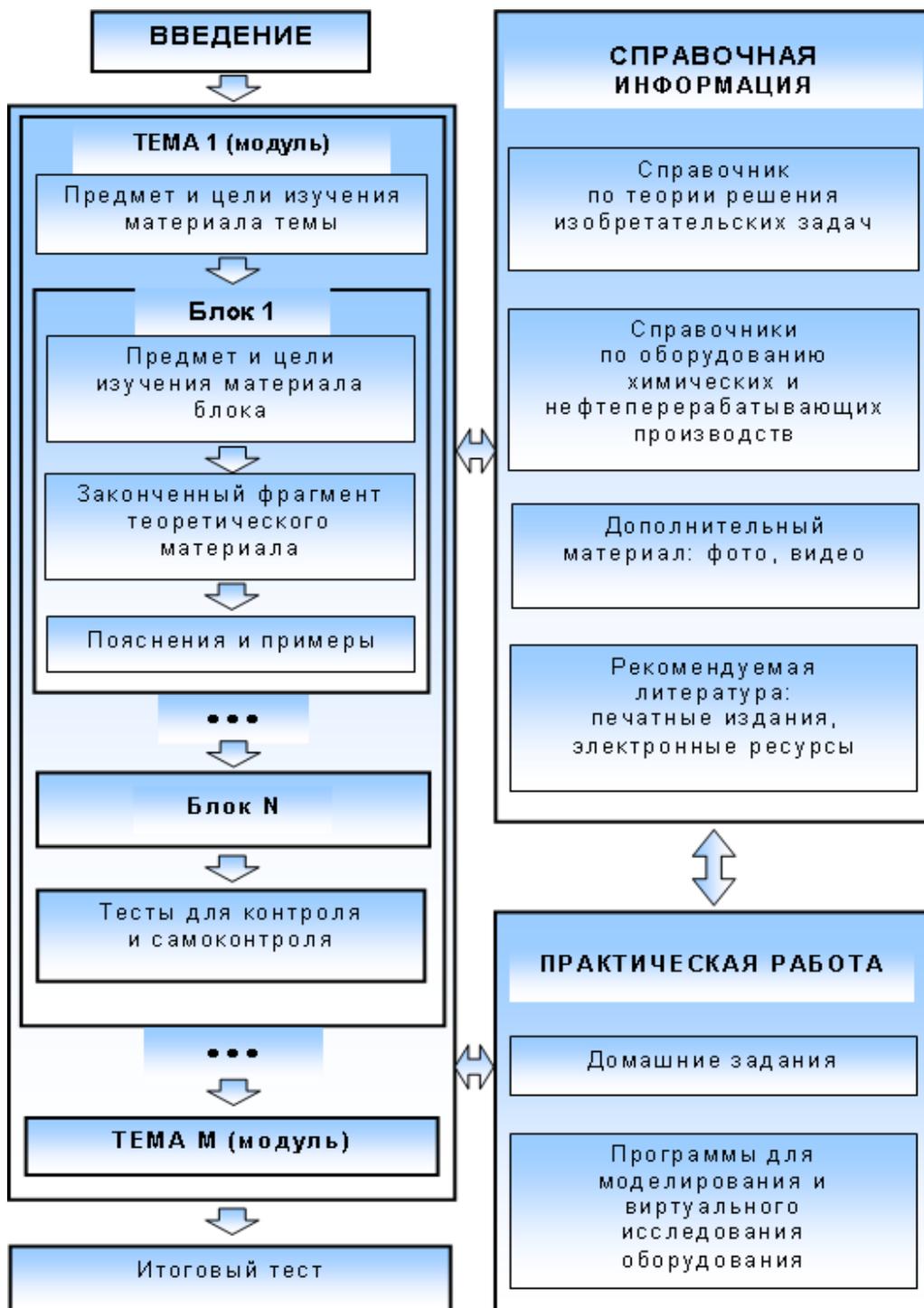


Рис. 1. Структура учебно-методического комплекса УМК-с

Главное требование, предъявляемое к УМК-с – модульность. Должна быть выдержана определенная структура комплекса. Это обусловлено следующими причинами:

организационной – разбивка материала на блоки облегчает студенту его изучение, позволяет регламентировать порядок взаимодействия с преподавателем.

функциональной – реализация гипертекстовых переходов в УМК-с предполагает обособленность смысловых фрагментов учебного материала.

Очевидно, что пригодной для любой дисциплины структуры УМК-с не существует, но набор возможных ее функциональных компонентов может быть, например, следующим (см. рис. 1):

- введение;
- блоки учебного материала;
- дополнительный материал и справочная база;
- виртуальный лабораторный практикум;
- тесты для самоконтроля и контроля;
- рекомендуемая литература.

Отдельные функциональные компоненты, например, блоки тестирования знаний, рекомендуется оформить в виде самостоятельных программных модулей.

Основной учебный материал каждой темы структурируется поблочно. Его рекомендуется начинать с изложения теоретического материала, а затем переходить к пояснениям и примерам. Основной материал должен быть представлен в максимально наглядной форме [2]. Для этого могут быть использованы различные программы: *OpenOffice.org*, *Windows Movie Maker* и др.

Дополнительный материал и справочная информация должны быть представлены в объеме, необходимом для решения задач, указанных в домашнем задании. В качестве дополнительного материала могут выступать: условные графические обозначения элементов технологических установок; расчетные формулы; константы; единицы измерения физических величин; ссылки на литературу, фрагменты видеофильмов, фотографии и др.

Уровень сформированных компетентностей оценивался по выполненным контрольным работам. При этом были сформулированы и предъявлены студентам критерии оценки: уровень усвоения материала; умение выделить в поставленной задаче наиболее значимые ее разделы; наглядность представления итоговых материалов и др. В правильно построенном УМК-э студент как бы ведет диалог с преподавателем, который предусмотрел возможные затруднения при изучении данной дисциплины. Используя в своей самостоятельной работе УМК-с, студенты

более глубоко начинают понимать, что и зачем они изучают, как полученные знания могут пригодиться им в будущей карьере.

Для сведения подготовленных материалов УМК-с в единый программный продукт могут быть использованы различные программные пакеты. Они различаются по своим функциональным возможностям, по сложности и многим другим характеристикам. Наиболее подходящими для выполнения этой работы являются те из них, которые обладают средствами визуального конструирования проектов; включают в себя библиотеки шаблонов, необходимые при решении типовых задач, возникающих в ходе создания УМК-э; имеют встроенные языки программирования; имеют инструментарий для создания мультимедийных приложений. Примерами таких программных средств являются: *Toolbook Instructor/ Assistant*, *HyperMethod*, *Macromedia Authorware*.

Среди них по функциональным и экономическим критериям следует отметить *HyperMethod*. Этот программный пакет представляет собой средство конструирования проектов, состоящих из коллекций кадров, связанных между собой гиперссылками. К основным достоинствам пакета *HyperMethod*, позволяющим студентам создавать хорошего качества учебно-методические комплексы, относятся:

- автоматическая расстановка динамических связей в документах по заданным разработчиком правилам;
- наличие автоматизированных средств создания и поддержки структуры разрабатываемой информационной системы;
- наличие событийно-ориентированного языка *HMScript* для описания объектов управления;
- поддержка форматов *HTML*, *RTF*, *TXT* и др.;
- прямая вставка в кадры рисунков в различных графических форматах: *BMP*, *GIF*, *WMF*, *EMF* и др.;
- поддержка звуковых форматов: *WAV*, *MIDI*, *MP3*;
- поддержка видеоформатов: *AVI*, *MPEG-1* и др.

Очень важно, что эта программа имеет интерфейс и справочную систему на русском языке, поэтому достаточно проста для ее освоения [4]. Компоновка всех объектов УМК-с осуществляется с помощью основного рабочего модуля *HyperMethod* — «Монтажного стола» (рис.2).

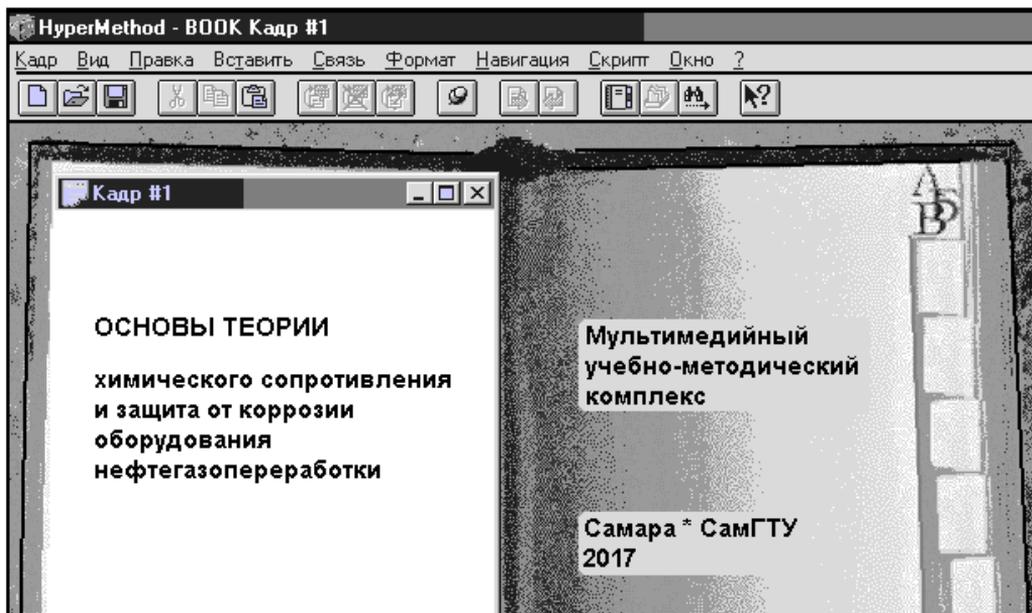


Рис. 2. Интерфейс рабочего модуля HyperMethod — «Монтажного стола»

Использование УМК-с способствует развитию профессиональных компетентностей студентов, развивает их общую грамотность, коммуникативную компетентность, навыки решения возникающих в процессе самостоятельной работы проблем. Используя УМК-с, студенты развивают способности использовать для достижения своих целей современные компьютерные технологии, работу с текстом, графикой, видео и др. Во время работы с комплексом формируется навыки планирования, самоорганизации, самоконтроля студента. Преподаватель при этом осуществляет консультирование и контроль выполнения домашнего задания. По мнению студентов, самостоятельная работа с использованием ТРИЗ способствует развитию профессиональных компетенций и формированию критического отношения к результатам своей деятельности, учит анализировать и оценивать свои действия.

Проведенное авторами исследование позволяет сделать следующие выводы: технология УМК-с способствует развитию умения анализировать и систематизировать теоретический материал; позволяет эффективно использовать существующий уровень сформированных умений и навыков, обозначить пробелы в подготовке студента. Также при анализе результатов эксперимента были получены данные об образовательных и личностных притязаниях студентов, отмечено повышение их ответственности за образовательные результаты. Результаты исследования имеют теоретическое и практическое значение для системы высшего образования

России ввиду возможности использования технологии УМК-с как эффективной системы развития профессиональной компетентности бакалавров технических направлений.

Библиографический список:

1. Кац, Н.Г. Основы теории химического сопротивления и защита от коррозии оборудования нефтегазопереработки: Монография / Н.Г.Кац, В.П.Стариков, С.Н.Панфилова, С.П. Лесухин. – Машиностроение, 2010. – 332 с.
2. Кац, Н.Г., Шимаров А.И. Мультимедийный комплекс по защите нефтегазового оборудования от коррозии. – Нефть.Газ.Новации/ н- т журнал №1/2012. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – С. 81-82.
3. *Кац Н.Г., Шимаров А.И.* Мультимедийный комплекс по защите трубопроводов от коррозии // Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013.– С. 81-83.
4. *Кац Н.Г., Шимаров А.И.* Электростатические методы и средства нанесения антикоррозионных покрытий: учебно-методическое пособие – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2012. – 98 с.
5. *Шимаров А.И.* Мультимедийный учебно-методический комплекс как средство повышения эффективности обучения. Вестник СамГТУ. Серия: Псих.-пед.науки. № 9. (17). Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – С. 168-170.
6. Шимаров, А.И. Технология подготовки материалов для мультимедийных программ: учеб. пособие / М.Л. Костырев, А.И. Шимаров. – Самара: СамГТУ, 2006. – 54 с. – ISBN 5-7964-0797-Х.
7. *Шимаров А.И.* Инновационное методическое сопровождение образовательных программ / А.М. Лашманов, А.И. Шимаров // Информационные технологии в образовательной деятельности вуза: сб. науч. тр. / Самарский гос. унт. – Самара, 2008. – С. 174-177.
8. *Шимаров, А.И.* Основы создания электронных учебников на базе *HyperMethod*: учеб. пособие / А.И. Шимаров. – Самара: СамГТУ, 2006. – 68 с.

УДК 621. 81

ВЫБОР ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ НАТЯГА

И.А.Кокорев

*Самарский государственный технический университет
Самара, Россия
barvika@samtel.ru*

Одним из важных вопросов при проектировании машин является учет влияния натяга в соединениях типа вал-ступица на их долговечность и несущую способность.

Профильные соединения – разъемные соединения типа вал-ступица, в которых ступица насаживается на фасонную поверхность вала (квадратного, треугольного, эллиптического сечения), применяют для передачи больших вращающих моментов от вала к ступице зубчатого колеса, шкива, звездочки и т.п. При реверсивной работе соединения должны иметь натяг.

По сравнению со шпоночными и штифтовыми соединениями профильные соединения имеют меньшую концентрацию напряжений и более высокую точность центрирования. Недостаток – сложность изготовления профильной поверхности.

В данной работе предлагается выбор профильного соединения вала со ступицей проверять расчетом напряженно-деформированного состояния модели узла, состоящей из вала и колеса (ступицы) с соответствующей фасонной посадочной поверхностью. Для расчета используется система ANSYS Workbench. Геометрическая модель узла строится в системе КОМПАС-3D.

Программный комплекс ANSYS является одним из лидирующих продуктов конечно-элементного анализа среди CAE-систем (систем автоматической разработки), позволяющий выполнять практически все виды инженерного анализа. Платформа Workbench имеет современный интерфейс, модуль геометрического моделирования на базе ядра Parasolid и позволяет объединить ANSYS с другими CAD-системами (системами автоматического проектирования). Среди множества CAD-систем система КОМПАС-3D выделяется удобным интерфейсом, легкостью и простотой освоения, а также большим количеством функций, команд и библиотек.

В качестве примера выполнен уточненный расчет профильного соединения на квадрате 45×45мм со скругленными углами (ГОСТ 9523-67),

длиной 46мм, нагруженного вращающим моментом $T=720\text{Нм}$, для двух посадок с натягом по граням $\delta_1=0,015\text{мм}$ и $\delta_2=0,009\text{мм}$. Материал вала и ступицы – сталь 45, термообработка улучшение, предел текучести $\sigma_T=540\text{МПа}$.

В ходе работы программы получено деформированное состояние узлов в целом, распределение контактных давлений и эквивалентных и касательных напряжений по всем деталям соединений, учитывающее влияние их взаимодействия и посадок.

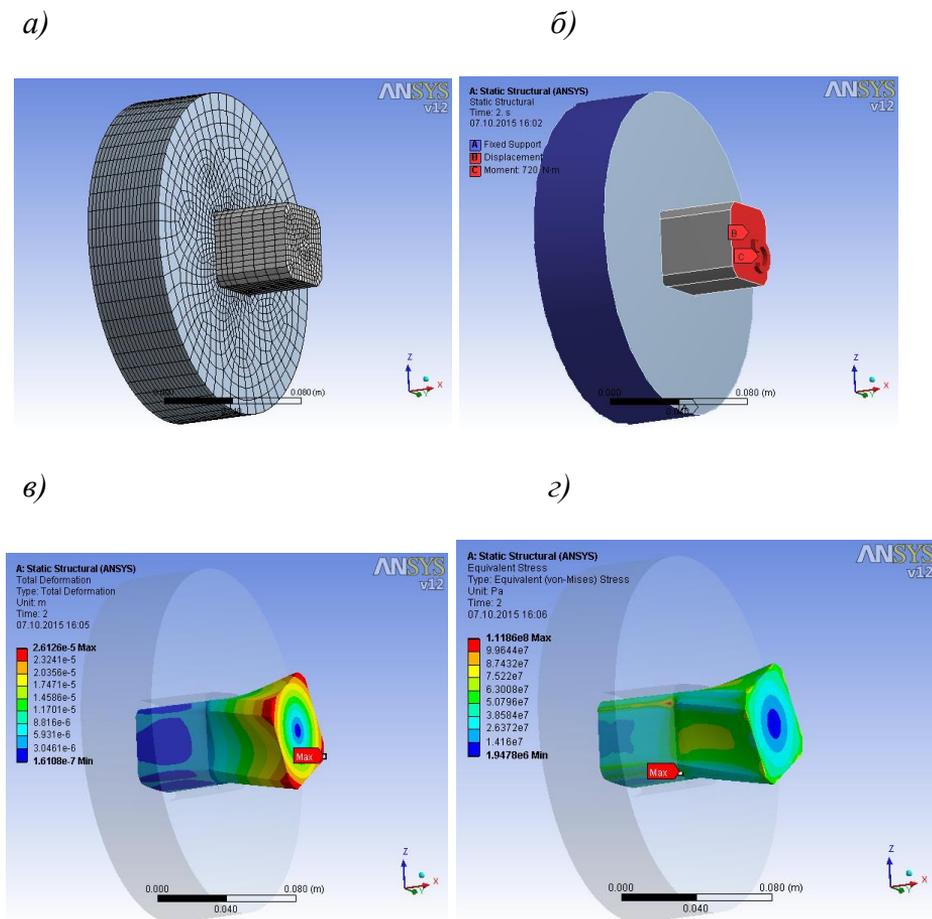
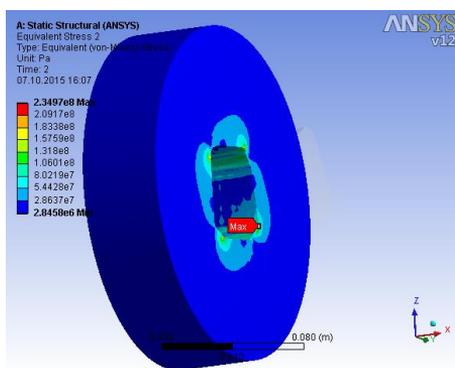


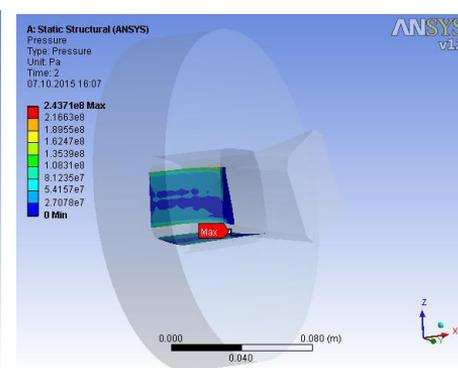
Рис. 1. Результаты решения задачи для профильного соединения с натягом $\delta_1=0,015\text{мм}$: а) – конечно-элементная модель; б) - заделка и нагрузка; в) – полное перемещение; г) – эквивалентные напряжения в вале

На рис.1 и 2 показаны основные этапы решения задачи для профильного соединения с натягом $\delta_1=0,015\text{мм}$: конечно-элементная модель; заделка – фиксация на наружной цилиндрической поверхности ступицы и равенство нулю нормального перемещения на торце вала; нагрузка – вращающий момент, приложенный на грани удаленного торца вала; полное перемещение; распределение эквивалентных и касательных напряжений и контактных давлений.

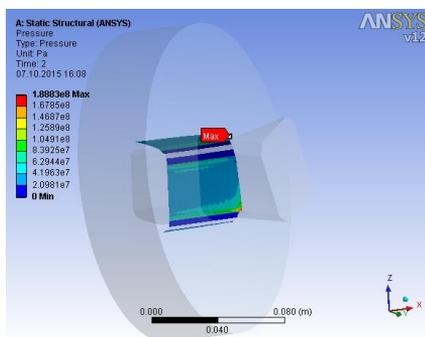
а)



б)



в)



г)

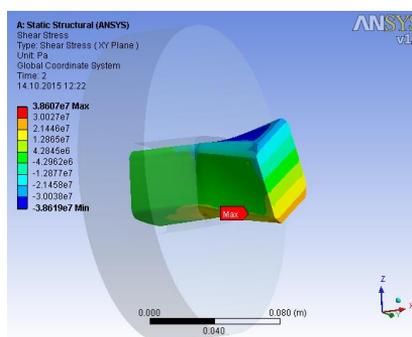


Рис.2. Результаты решения задачи для профильного соединения с натягом $\delta_1=0,015\text{мм}$: ; а) – эквивалентные напряжения в ступице; б) – контактное давление на рабочих участках граней вала; в) – контактное давление на гранях в отверстии ступицы; г) – касательные напряжения в вале

Полное перемещение вала 0,026126мм. Максимальное эквивалентное напряжение возникает в ступице и равно $\sigma_{\text{ЭКВ}}=234,97\text{МПа}$. Максимальное эквивалентное напряжение в вале $\sigma_{\text{ЭКВ}}=111,86\text{МПа}$. Во всех деталях максимальное эквивалентное напряжение меньше предела текучести материала. Максимальное значение касательных напряжений в вале $\tau_{\text{max}}=38,607\text{МПа}$. Максимальное контактное давление на рабочих гранях вала и в отверстии ступицы соответственно $\rho_{\text{max}}=243,71\text{МПа}$ и $\rho_{\text{max}}=188,83\text{МПа}$.

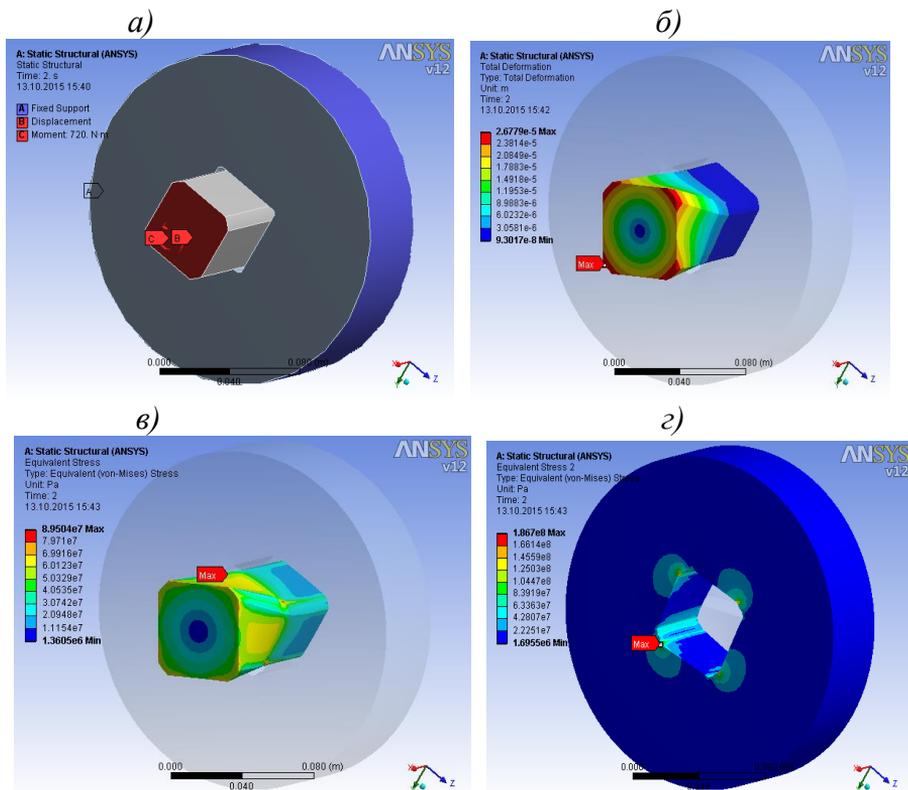


Рис.3. Результаты решения задачи для профильного соединения с натягом $\delta_2=0,009\text{мм}$: а) – заделка и нагрузка; б) – полное перемещение; в) – эквивалентные напряжения в вале; г) – эквивалентные напряжения в ступице

На рис. 3 и 4 приведены результаты решения задачи для профильного соединения с натягом $\delta_2=0,009\text{мм}$. Максимальное эквивалентное напряжение возникает в ступице и равно $\sigma_{\text{ЭКВ}}=186,7\text{МПа}$. Максимальное эквивалентное напряжение в вале $\sigma_{\text{ЭКВ}}=89,504\text{МПа}$. Во всех деталях максимальное эквивалентное напряжение меньше предела

текучести материала. Максимальное значение касательных напряжений в вале $\tau_{\max}=38,658\text{МПа}$. Максимальное контактное давление на рабочих гранях вала и в отверстии ступицы соответственно $p_{\max}=192,91\text{МПа}$ и $p_{\max}=150,46\text{МПа}$.

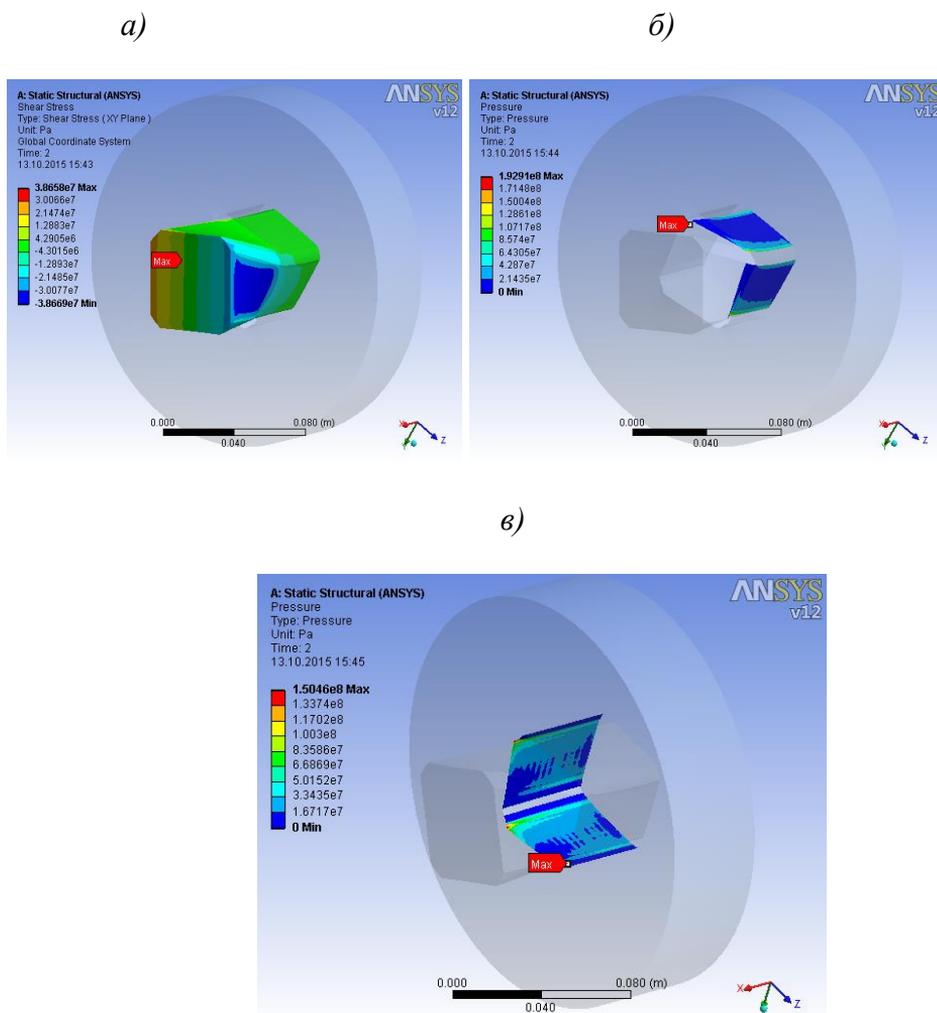


Рис.4. Результаты решения задачи для профильного соединения с натягом $\delta_2=0,009\text{мм}$: а) – касательные напряжения в вале; б) – контактное давление на рабочих участках граней вала; в) – контактное давление на гранях в отверстии ступицы

Таким образом, получено напряженно-деформированное состояние профильного соединения вала со ступицей с учетом взаимодействия образующих его деталей и натяга.

Показано влияние натяга на работу деталей профильного соединения.

Полученные результаты могут быть использованы для уточненного расчета и окончательного конструктивного оформления валов. Развитие данного подхода позволит совершенствовать выбор профильных соединений с более точным учетом условий их работы.

УДК 62-213.6

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОЛЬЦА

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

*СамГТУ
г. Самара, Россия
nikolai_dedov@mail.ru*

Нефтегазовое оборудование, выполненное из углеродистых и низколегированных сталей и работающее при нагружении давлением, постоянно контактирует с продуктами, насыщенными химически активными веществами, вызывающими коррозию.

Проведенные исследования [1] показали, что основным фактором, определяющим скорость механокоррозии в заданных условиях, является дислокационная структура металла, которая определяется историей предыдущих нагружений, уровнем действующих напряжений и видом напряженного состояния. Знания зависимостей скорости коррозии от уровня действующих напряжений и видов напряженно-деформированного состояния имеют большое значение для проектирования и назначения режимов эксплуатации конструкций емкостей, трубопроводов различного назначения, бурового оборудования [2].

Установление связи скорости коррозии с уровнем напряжения базируется на экспериментальных исследованиях. Основным элементом экспериментальной установки для исследования влияния механической нагрузки на скорость развития коррозии является тарированное испытательное кольцо, выполненное из конструкционной подшипниковой стали. В данной работе рассматривается теоретическое и экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния испытательного кольца при нагружении его нагрузками, приходящими с образца испытываемого материала. Проведена тарировка

испытательного кольца и построены графики теоретической и экспериментальной зависимости «нагрузка–перемещение».

Теоретические и экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния были проведены для испытательного кольца с характеристиками:

- максимальная нагрузка 3500 кг;
- внутренний диаметр кольца 183,22 мм;
- ширина кольца 51,23 мм;
- толщина кольца 9,68 мм;
- фаски по внутреннему и наружному диаметрам кольца 2,5 мм;
- ширина площадки 63,68 мм;
- высота площадки 18,01 мм;
- материал сталь ШХ15 (модуль упругости $2 \cdot 10^5$ МПа).

Кольцо предназначено для создания растягивающей нагрузки на образец при коррозионных испытаниях. Приложение нагрузки осуществляется вращением винта, проходящего через центр площадок. Каждое тарированное испытательное кольцо поставляется с таблицей, по которой можно определить нагрузку на образец. Перемещение кольца в процессе нагружения измеряется микрометром. Установка оснащена стандартной климатической камерой, изготовленной из прозрачного и прочного акрилового полимера, что дает возможность постоянного визуального наблюдения за образцом. Климатическая камера позволяет проводить коррозионные испытания при повышенных температурах вплоть до 100 °С.

Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния испытательного кольца. Расчет испытательного кольца проведен с использованием пакета конечно-элементного анализа ANSYS [3, 4].

С учетом симметрии по трем взаимно перпендикулярным плоскостям, была построена геометрическая модель одной восьмой части кольца.

Для решения задачи был выбран трехмерный конечный элемент типа *SOLID185*, имеющего три степени свободы в каждом узле – перемещения по координатным осям *X*, *Y*, *Z*. Конечно-элементная модель одной восьмой части кольца с закреплением и нагрузкой представлена на рис. 1. Нагрузка прикладывается через площадку опорного подшипника при вращении винта, проходящего через центр площадок.

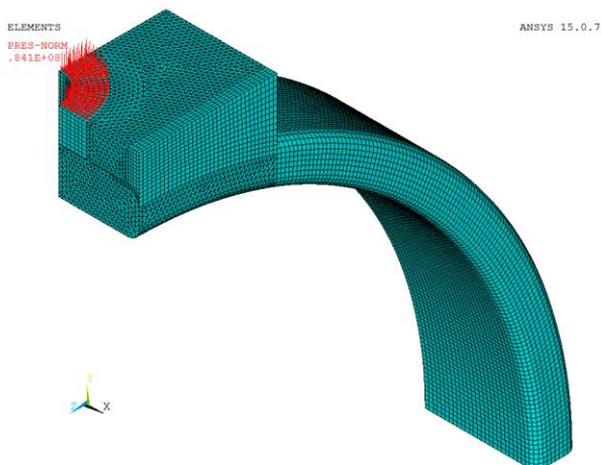


Рис. 1. Конечно-элементная модель одной восьмой части кольца и ее нагружение

Исследование напряженно-деформированного состояния проводилось при нагружении кольца силой 1000 кг. Было получено распределение напряжений и деформаций по всей конструкции кольца. На рис. 2 приведено распределение интенсивности эквивалентных по Мизесу напряжений, при этом наибольшие упругие эквивалентные напряжения по Мизесу в зонах концентрации равны 511 МПа. Оценку величины напряжений в зонах концентрации, полученных в упругой области, необходимо проводить для конкретного концентратора и материала с учетом экспериментальных значений коэффициента чувствительности материала к концентрации напряжений.

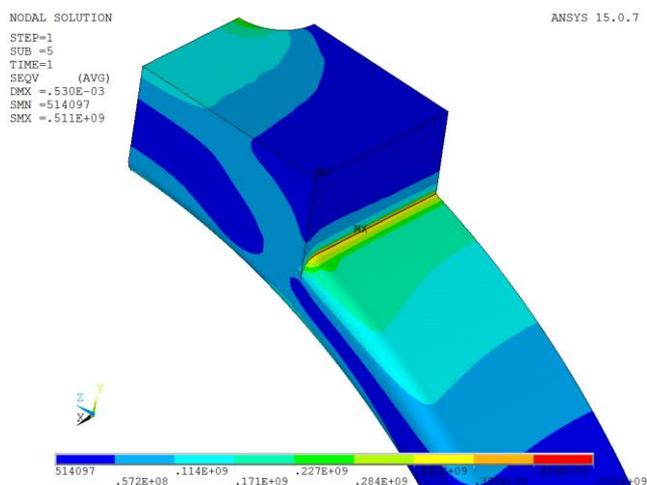


Рис. 2. Распределение интенсивности эквивалентных по Мизесу напряжений

Получены значения перемещений площадки в случае приложения равномерно распределенной нагрузки и в случае задания постоянного перемещения точек площадки в направлении перпендикулярном к площадке. Зависимости между перемещениями и величинами нагрузки приведены на рис. 3. Наибольшее радиальное перемещение кольца 1,06 мм. Расхождение двух представленных схем нагружения, соответствующих нагрузке 1000 кг, не превышает 4%.

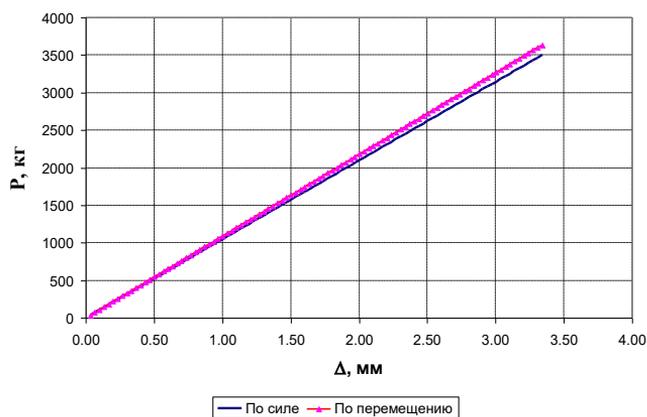


Рис. 3. Зависимости между силами и перемещениями при задании равномерного давления или равномерного перемещения

Экспериментальное исследование радиальных перемещений испытательного кольца. Для проверки точности теоретических расчетов проводилось испытание указанного кольца на сжатие радиальной нагрузкой. Испытания проводились на испытательной машине *Instron 5988* при статическом нагружении максимальной радиальной нагрузкой до 1050 кг со скоростью 0,15 мм/мин. В процессе испытаний замерялись радиальные перемещения площадки нагружения. Результаты испытаний обрабатывались для каждой нагрузки с увеличением ее на каждом шаге на 35 кг.

На рис. 4 представлена зависимость между силами и перемещениями при испытании кольца на сжатие.

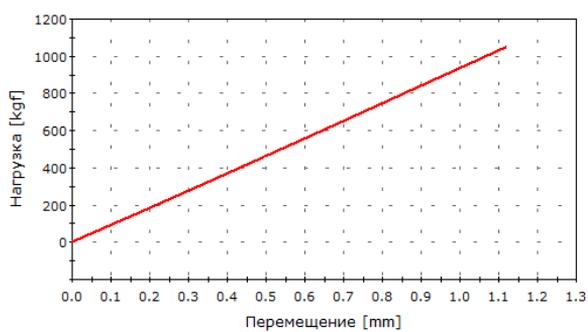


Рис. 4. Зависимости между силами и перемещениями при испытании кольца на сжатие

Результаты сравнения теоретических перемещений (рис. 3) с экспериментальными (рис. 4) при нагрузке 1000 кг показывают, что отличия не превышают 5%.

Библиографический список:

1. Шмитт-Томас К.Г. *Металловедение для машиностроения: Справочник.* М.: Металлургия, 1995. С. 512.
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.