

УДК 378.14

DOI: 10.54835/18102883_2025_37_4

Опыт внедрения курса численного моделирования в рамках дисциплины «проектная деятельность» для студентов направления «нефтегазовое дело»

Петр Владимирович Чепур¹,

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительной механики
chepur_p_v@mail.ru

Алеся Анатольевна Колядко²,

кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела
alesya2010-11@yandex.ru

Илья Сергеевич Сухачев¹,

кандидат технических наук, доцент, заведующий базовой кафедрой АО «СУЭНКО»
suhachevis@tyuiu.ru

Александр Алексеевич Тарасенко¹,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры транспорта углеводородных ресурсов
a.a.tarasenko@gmail.com

¹ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38

² Филиал Тюменского индустриального университета в г. Сургуте,
Россия, 628404, г. Сургут, ул. Энтузиастов, 38

Цель работы состоит в демонстрации широкой аудитории опыта ведения проектно-ориентированного обучения студентов направления «нефтегазовое дело» на примере решения задачи расчета прочности вертикального стального резервуара для хранения нефти численным способом в программе ANSYS. Обозначена актуальность использования проектно-ориентированного подхода в образовательном процессе будущих инженеров, рассмотрены все этапы работы с проектом. Выполняя операции эскизирования и моделирования, обучающиеся разрабатывают геометрическую модель резервуара в соответствии с заданными размерами, создают конечно-элементную сетку, задают нелинейные свойства резервуарной стали, вводят граничные условия, задают эксплуатационные нагрузки и воздействия, устанавливают контактные взаимодействия различных частей модели, определяют необходимые параметры для прочностного анализа, запускают решение задачи, анализируют и интерпретируют полученные результаты. Для реализации каждого действия в ANSYS указаны названия соответствующих команд и их расположение в интерфейсе. Представлены графические результаты численного моделирования. Внедрение курса численного моделирования в реализацию дисциплины «проектная деятельность» позволило укрепить связь дисциплин, предшествующих данному курсу. В ходе работ студенты использовали компетенции дисциплин «метрология и стандартизация», «сопротивление материалов», «начертательная геометрия» и «технический иностранный язык». В заключение отмечена значимость результатов интеграции теоретических знаний и практических навыков в предложенном формате, важность междисциплинарного подхода в образовательном процессе и умения коммуницировать с другими студентами при работе над проектом. Данный курс дает возможность овладеть современными инструментами моделирования инженерных сооружений для решения комплексных инженерных задач, что существенно повышает конкурентоспособность выпускников на рынке труда.

Ключевые слова: инженерное образование, проектно-ориентированный подход, проектная деятельность, численное моделирование, ANSYS, резервуар, системное и критическое мышление, работа в команде

Введение

В настоящее время инженерное образование стремительно адаптируется к требованиям рынка труда, ориентируясь на компетенции, знания и навыки, необходимые для успешной профессиональной деятельности выпускников [1, 2]. Применение проектно-ориентированного подхода в современном инженерном

образовании позволяет максимально эффективно интегрировать теоретические знания с практическими умениями и навыками, поэтому с каждым годом получает все более широкое распространение [3–5]. Внедрение проектной деятельности в образовательный процесс обусловлено необходимостью подготовки высококвалифицированных специалистов, которые

способны эффективно решать комплексные задачи, связанные с проектированием, разработкой и внедрением инновационных технологий [6, 7]. Создание такого «мостика» между теорией и практикой способствует качественному освоению профильных дисциплин, повышению мотивации студентов и их вовлеченности в образовательный процесс [8–10].

В Тюменском индустриальном университете утвержден учебный план по программе бакалавриата направления «нефтегазовое дело» профиля «проектирование, сооружение и эксплуатация нефтегазотранспортных систем» очной формы обучения, который включает дисциплину «проектная деятельность». Освоение данной дисциплины происходит в течение первых четырех семестров обучения. Общая трудоемкость дисциплины в одном семестре составляет 72 академических часа, из них 34 часа занимают практические работы и 38 часов отводится для самостоятельной работы. В результате освоения дисциплины у обучающихся должно сформироваться критическое и системное мышление, что особенно важно для инженеров, а также развиться навыки коммуникации и сотрудничества, позволяющие эффективно взаимодействовать как внутри команды, так и вне её.

В рамках рассматриваемой учебной дисциплины авторами статьи внедрен курс, посвященный обучению студентов численному моделированию объектов нефтегазовой отрасли с использованием современного программного комплекса ANSYS Mechanical Workbench [11–13]. На наш взгляд это позволит обучающимся освоить современные инструменты проектирования, что обеспечит им конкурентное преимущество на рынке труда и повысит качество выполнения профессиональных задач. Кроме того, у обучающихся появляется возможность приобрести навыки анализа и интерпретации результатов моделирования реальных полномасштабных инженерных сооружений в различных условиях эксплуатации, не покидая стен университета.

В статье на примере актуальной научно-технической задачи расчета прочности и устойчивости резервуара вертикального стального (РВС) для хранения нефти пошагово описывается процесс численного моделирования. На практических занятиях студенты последовательно выполняют задания из перечня, установленного для каждого из трех этапов [14]:

- 1) препроцессинг;
- 2) решение;
- 3) постпроцессинг.

На препроцессинговом этапе требуется: создать геометрическую трехмерную модель резервуара, поэтапно разрабатывая его отдельные конструктивные части (днище, стенку, крышу и др.); выполнить генерацию конечно-элементной сетки и настроить её основные параметры; задать физико-механические свойства резервуарной стали, различные нагрузки и воздействия, граничные условия; установить параметры анализа. К этапу решения относится запуск решателя и непосредственно процесс вычислений, происходящий в автоматическом режиме. Заключительный этап постпроцессинга состоит из операций анализа и интерпретации полученных данных [15]. Разработанная в ходе курса численная модель является универсальной, так как позволяет получить результаты расчета для других типоразмеров резервуаров со стационарной крышей.

Основная часть

Так как в учебном плане лекции по «проектной деятельности» не предусмотрены, на практических занятиях студентам выдавался подробный алгоритм создания модели, включающий иллюстрации в виде скриншотов с пояснениями из программы ANSYS Mechanical Workbench и названия всех используемых команд с указанием их расположения в графическом интерфейсе программы. Исходными данными для работы были реальные геометрические размеры резервуара, числовые значения действующих на него нагрузок и расчетная схема. Чтобы результаты прочностного расчета были максимально точными, необходимо разработать модель резервуара, которая будет максимально соответствовать фактической конструкции сооружения. Все геометрические и конструктивные характеристики принимаются на основе реальной проектно-конструкторской документации. Создаются геометрические модели: днища, восьми поясов цилиндрической стенки, верхнего опорного кольца, каркаса стационарной крыши.

Первым этапом на панели инструментов, открывшейся после загрузки программы, необходимо выбрать режим «Static Structural» [16, 17]. Создание геометрической модели производится в модуле геометриче-

ского построения примитивов «Geometry» – DesignModeler. Определяется координатная плоскость для разработки плоского эскиза конструктивного элемента сооружения. Далее посредством специальных операций (например, «Вращение», «Выдавливание», «Перемещение по траектории») осуществляется переход от плоских примитивов к поверхностям и объемным телам.

Предлагается начать с построения днища. В выбранной плоскости строится отрезок требуемой длины с помощью команды «Line». Затем выполняется операция вращения эскиза «Revolve» вокруг оси, перпендикулярной плоскости построения эскиза, на 360° (рис. 1), в результате чего формируется полотно днища. Для создания окрайки днища необходимо повторить указанные шаги.

Далее необходимо создать стенку резервуара, которая состоит из 8 поясов. Для создания эскиза с помощью команды «Circle» необходимо построить окружность и задать её радиус. Затем, применив команду «Extrude», выполнить операцию линейного выдавливания на высоту пояса стенки в заданном направлении, в результате получится объемное тело в виде тонкостенной оболочки. Эти действия необходимо повторить для оставшихся 7 поясов (рис. 2, а). Моделирование опорного кольца в верхнем поясе выполняется аналогично моделированию днища, при этом эскиз представляет собой поперечное сечение опорного кольца (рис. 2, б).

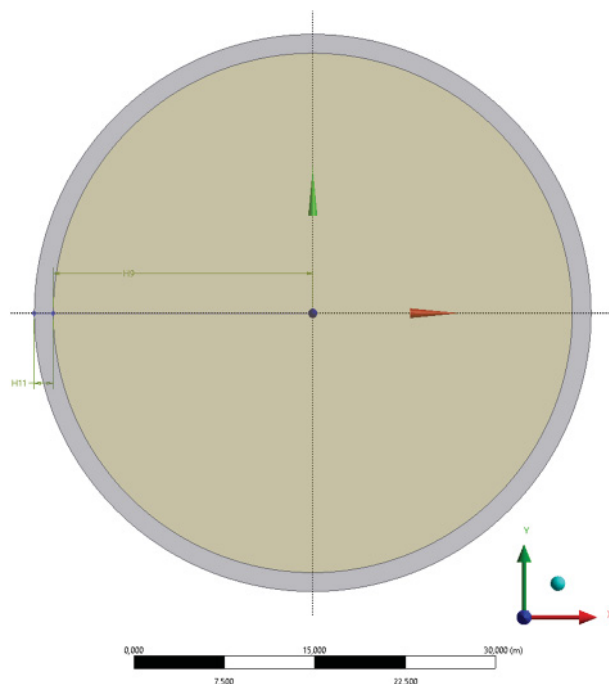


Рис. 1. Моделирование полотна днища и окрайки
Fig. 1. Modeling the bottom panel and edge

Моделирование стационарной крыши РВС выполняется в два этапа: 1 – разработка модели балочного каркаса, 2 – разработка модели настила. На первом этапе необходимо создать 48 двутавровых балок вальцованного профиля и 288 уголков. Для этого выполняется построение эскиза поперечного сечения двутавровой балки с помощью команды «Line», затем применяется команда «Arc by Tangent» и производится операция протягивания вдоль

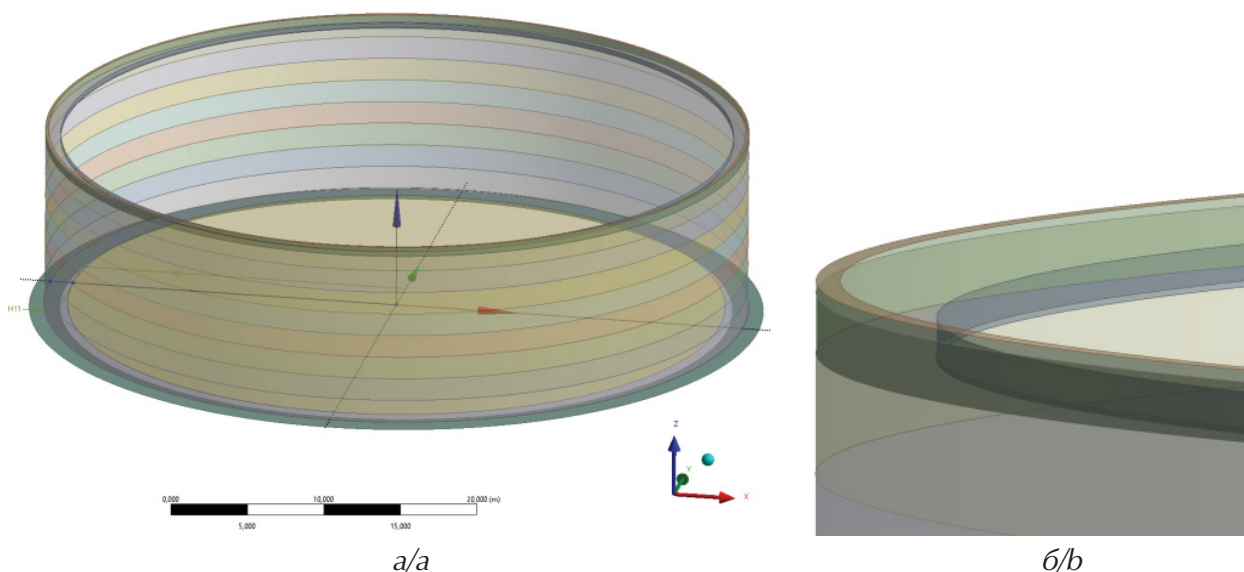


Рис. 2. Моделирование поясов стенки и опорного кольца: а) геометрическая модель РВС-20000; б) геометрический узел кольца жесткости

Fig. 2. Modeling of wall belts and support ring: а) geometric model of RVS-20000; б) geometric node of the stiffening ring

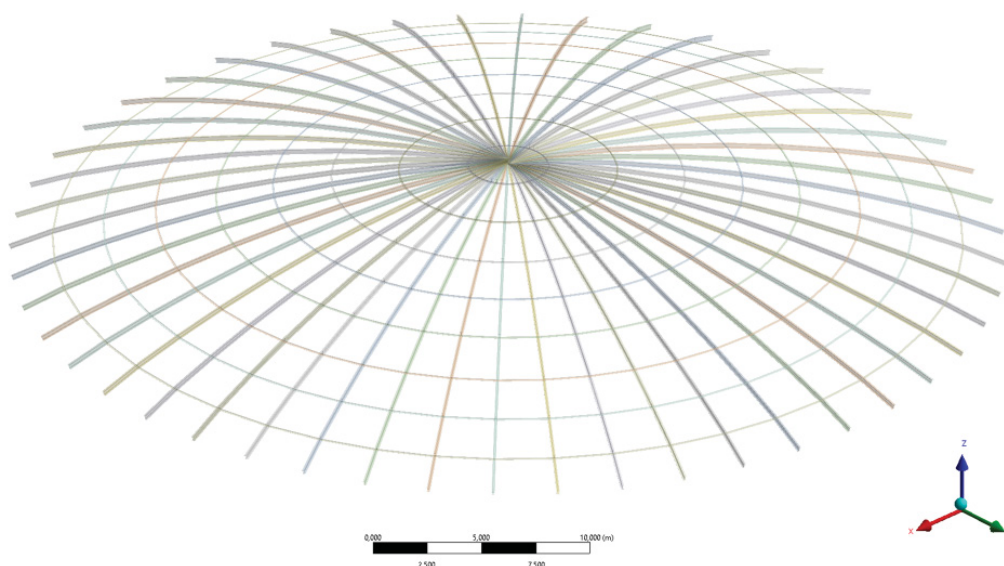


Рис. 3. Моделирование несущего каркаса крыши РВС
Fig. 3. Modeling of the supporting frame of the tank roof

контура «Sweep», что позволяет получить объемное тело несущей балки с требуемым изгибом. Для построения оставшихся 47 балок (рис. 3) необходимо выбрать команду копирования по шаблону «Pattern» в меню «Create». Моделирование уголков, выполняющих функцию поперечных связей, производилось аналогично. Кроме того, командой «Construction Point» на несущих балках генерируются точки сопряжения. Для построения одномерных геометрических тел, которые выполняют функцию промежуточных связей, используется команда «Lines from points».

На втором этапе для создания настила крыши применяется команда «Surfaces from edges», позволяющая получить поверхность настила путем вращения образующей главной балки каркаса относительно оси, проходящей через центр резервуара. При использовании данной команды необходимо установить радиальный размер вращения, равный 15° , это связано с тем, что модель настила состоит из 24 секторов. На этом этапе построение геометрической модели резервуара завершается (готовая геометрическая модель резервуара представлена на рис. 4).

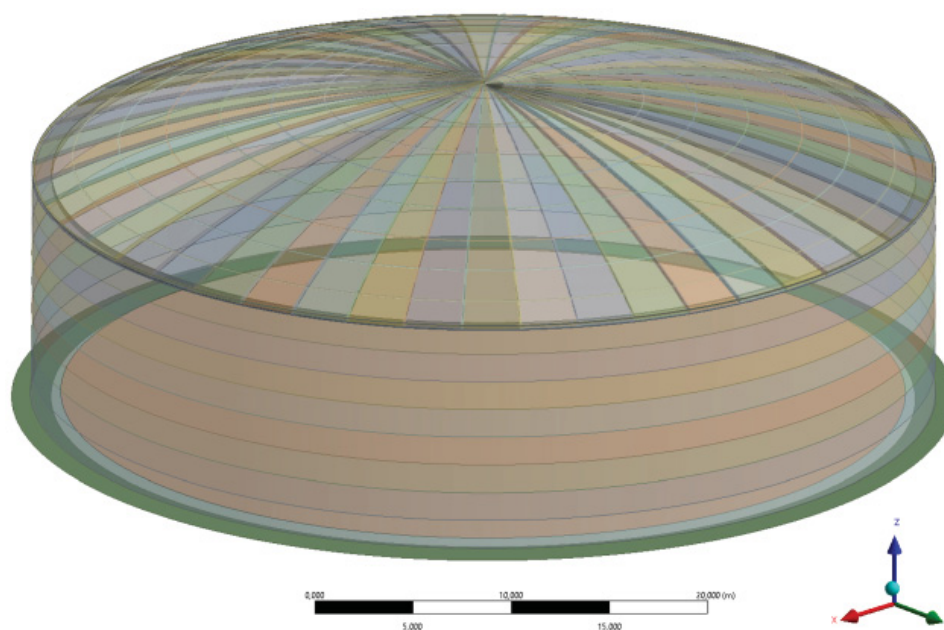


Рис. 4. Готовая геометрическая модель резервуара в ПК ANSYS
Fig. 4. Ready geometric model of the tank using ANSYS

Корректная работа созданной модели предполагает учёт толщин всех оболочечных элементов, поэтому далее требуется задать значения толщин оболочечных и балочных конструкций в разделе «Model» модуля «Static Structural» выбрав свойство «Thickness». Для этого важно выбрать необходимые единицы измерения в меню «Units».

Для задания физико-механических свойств резервуарной стали в этом же модуле необходимо перейти в раздел управления материалами «Engineering Data» [18]. Выбрав библиотеку нелинейных материалов «General Nonlinear Materials», необходимо нажать на знак «+» напротив стали марки 09G2S. В развернувшемся окне свойств материала задать следующие параметры: «Volumetric compression module» – 166600 МПа; «Shear modulus» – 76923 МПа; «Tangent modulus» – 1450 МПа; «Poisson's ratio» – 0,3.

Чтобы преобразовать геометрическую модель резервуара в численную, необходимо разбить её на конечные элементы, то есть сгенерировать конечно-элементную сетку (рис. 5). Процесс создания сетки осуществляется в следующей последовательности: сначала определяются характеристики конечных элементов, затем устанавливаются свойства сетки, после чего производится её генерация. Первые два этапа имеют решающее значение, поскольку фактор плотности сетки, форма и тип конечного элемента существенно влияют на точность решения.

При создании сетки для таких конструктивных частей РВС, как центральная и краевая часть днища, стенка, опорное кольцо и настил крыши, рекомендуется использовать оболочечные конечные элементы «Surface body». Линейные балочные элементы «Beam» используются для сетки балочного каркаса крыши (несущие балки и уголки). Далее необходимо задать свойства конечно-элементной сетки, для этого необходимо выполнить следующие шаги:

- задать значение плотности конечно-элементной сетки «Relevance» – 20;
- установить жесткую «Aggressive Mechanical» проверку формы элементов «Shape Checking»;
- установить среднее значение «Medium» сглаживания сетки «Smoothing»;
- установить размер конечного элемента «Element Size»: днище, стенка, настил крыши – 0,45, опорное кольцо – 0,025–0,1;
- установить в окне центра диапазона углов «Span Angle Center» вариант «Medium»;
- в меню «Mesh control» в окне «Method» установить способ проверки формы элементов «Automatic».

Последним шагом в процессе создания сетки является её генерация с помощью команды «Generate mesh», модель резервуара с конечно-элементной сеткой представлена рис. 5.

Далее необходимо задать контакты модели в разделе «Connections/Contacts». С помо-

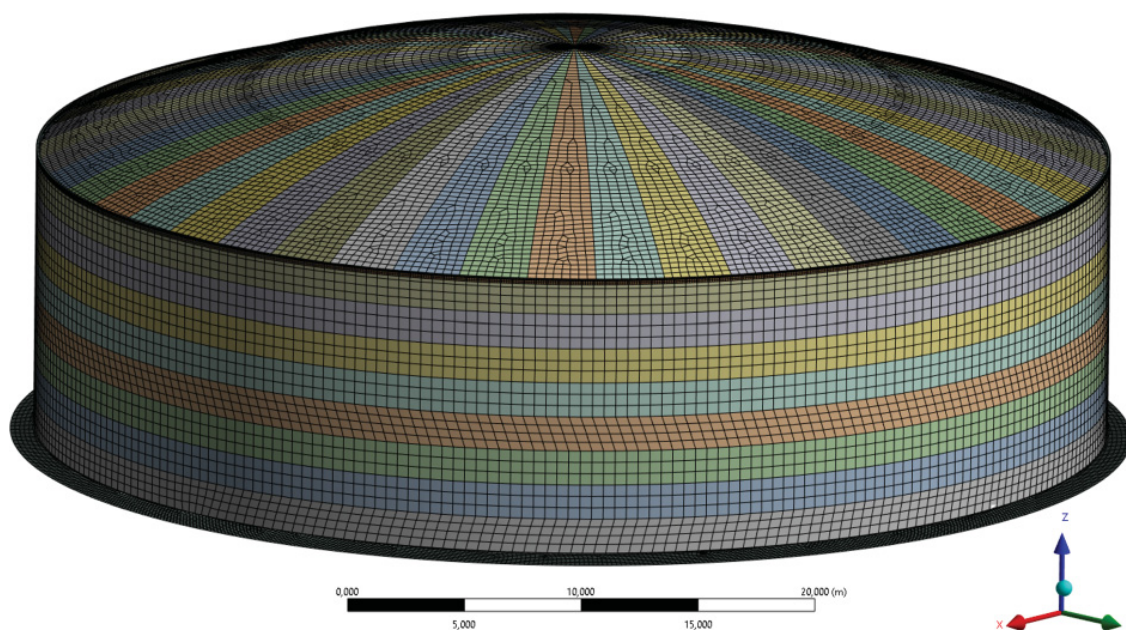


Рис. 5. Конечно-элементная модель резервуара
Fig. 5. Finite-element model of the tank

шью команды «Insert» следует добавить все контактные взаимодействия типа «Bonded» для конструктивных элементов модели: «пояс стенки – пояс стенки», «опорное кольцо – пояс стенки», «окрайка – пояс стенки», «окрайка – центральная часть днища», «балочный каркас – настил», «балочный каркас – опорное кольцо». Приступим к установке граничных условий в разделе «Supports». Учитывая, что в реальных условиях эксплуатации РВС в качестве основания используются подготовленные грунтовые подушки и различные конструкции фундаментов, для центральной и окраечной части днища требуется задать граничное условие «Elastic support» [19, 20], т. е. упругое закрепление. Задав в меню «Definition» коэффициент постели «Foundation stiffness» 210 МН/м^3 (на основании данных реальных изысканий объектов, эксплуатируемых на территории Западной Сибири), удастся смоделировать уплотненное грунтовое основание под резервуаром.

Задавать нагрузки и воздействия необходимо в соответствии с принятой расчетной схемой (рис. 6).

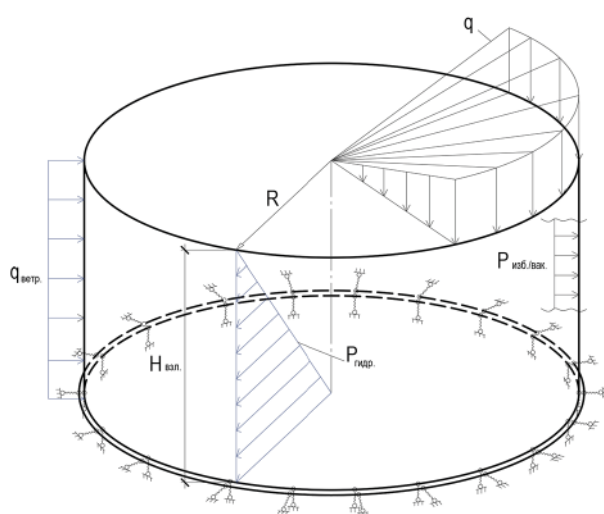


Рис. 6. Расчетная схема
Fig. 6. Calculation scheme

В разделе «Static structural» нагрузка задается через команду «Insert» путем выбора типа нагрузки, задания поверхности её приложения и числового значения:

- с помощью команды «Standard Earth Gravity» задать гравитационное ускорение – $9,8066 \text{ м/с}^2$;
- с помощью команды «Hydrostatic pressure» задать гидростатическую нагрузку, действующую на стенку, центральную часть

днища и окрайку, а именно установить параметры: плотность жидкости «Fluid density» – $0,850 \text{ г/см}^3$, уровень налива жидкости «Free surface location» – 10870 см ;

- с помощью команды «Force» задать нагрузку от снега и от веса оборудования, располагающегося на крыше РВС – 1200 кН ; нагрузку от ветра к внешней стороне корпуса резервуара величиной $0,235 \text{ кПа}$;
- с помощью команды «Pressure» смоделировать избыточное давление внутри корпуса РВС – 2000 Па , и вакуумметрического давления – 250 Па .

Препроцессинг завершается выбором параметров прочностного анализа. Для этого в разделе «Solution» путем команды «Insert» нужно добавить параметр результатов конечно-элементного анализа «Total deformation», определяющий деформации конструкции, и параметр «Equivalent stress», определяющий эквивалентные напряжения. Теперь численная модель резервуара полностью готова для проведения расчетов. Чтобы запустить решатель, требуется активировать команду «Solve». Если все было сделано верно, то возле названий параметров анализа появятся галочки зеленого цвета.

Следующим этапом является проведение постпроцессинговой обработки. При выборе параметра «Total deformation» в графическом окне появится эпюра распределения деформаций в конструкции резервуара, при выборе параметра «Equivalent stress» – эпюра распределения эквивалентных напряжений (рис. 7). Каждая эпюра имеет шкалу цветного спектра с соответствующими числовыми значениями. Анализ полученных результатов позволяет оценить напряженно-деформированное состояние резервуара, а также сделать вывод о его эксплуатационной пригодности (или необходимости ремонта). Чтобы создать отчет по результатам анализа необходимо использовать команду «View report», отчет включает текстовое описание, графики, таблицы и рисунки.

Проведение занятий в представленном формате позволяет обучить студентов процессу решения сложных инженерных задач, в частности, тех, для которых аналитического решения не существует ввиду сложной геометрии и сочетания нагрузок. Использование навыков численного моделирования в работе дает возможность минимизировать затраты как при решении инженерных задач, так и при проведении научно-ис-

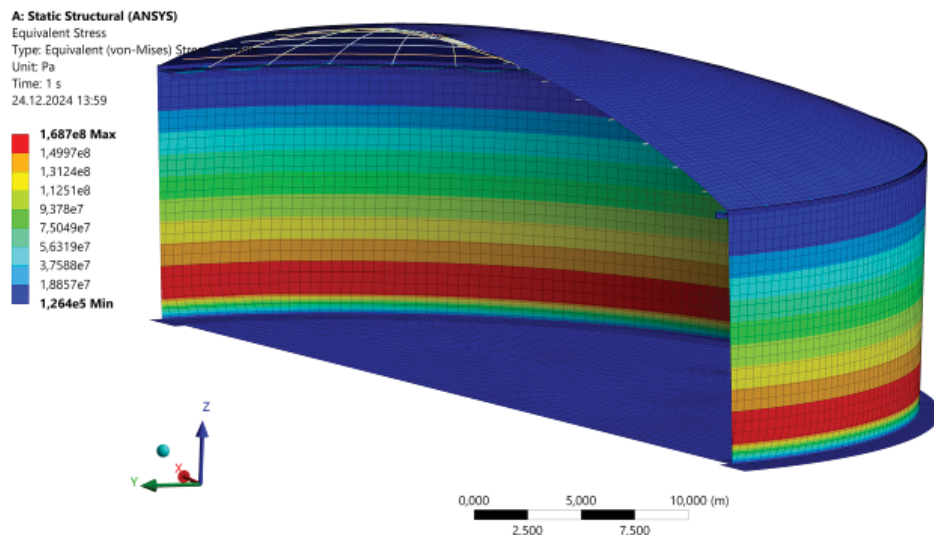


Рис. 7. Эпюра эквивалентных напряжений

Fig. 7. Stress distribution diagram in the tank structure

следовательской работы. Численные методы позволяют выявлять и своевременно устранять потенциальные проблемы, коллизии, проводить оптимизационные вычисления. Обучение моделированию в рамках проектной деятельности способствует проявлению креативности и нестандартного мышления, развитию аналити-

ческих навыков, применению знаний из смежных дисциплин, а также приобретению опыта командной работы.

Выражаем благодарность анонимным рецензентам за рекомендации, позволившие улучшить качество публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миляева А.К., Мысин О.И., Ваганова О.И. Проектно-исследовательская деятельность в образовательном процессе вуза // Проблемы современного педагогического образования. – 2023. – № 81-1. – С. 92–95. EDN: TBUCOC
2. Стародворцева Н.П., Куликова М.Г., Маслова К.С. Проектная деятельность студентов технического вуза как пример успешной молодежной практики // Энергетика, информатика, инновации – 2019: Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. В 2-х т. – Смоленск: Универсум, 2019. – Т. 2. – С. 355–358. EDN: ARTKZY
3. Рахманова Ю.К., Каргапольцева С.И. Проектная деятельность в техническом вузе // Молодой ученый. – 2016. – № 11 (115). – С. 1527–1531. EDN: WGGUYL
4. Переосмысление инженерного образования. Подход CDIO / Э.Ф. Кроули, Й. Малмквист, С. Остлунд, Д.Р. Бродер. – М.: ИД Высшей школы экономики, 2015. – 504 с.
5. Цирульникова Е.А. Особенности организации проектной деятельности в процессе профессиональной подготовки студентов педагогического вуза // Ученые записки Орловского государственного университета. – 2021. – № 4 (93). – С. 293–295. EDN: KYEPWS
6. Терюшкова Ю.Ю. Особенности организации проектно-исследовательской деятельности в современном вузе // Приоритетные направления развития высшего образования в Российской Федерации: коллективная монография / отв. ред. А.Ю. Нагорнова. – Ульяновск: Зебра, 2023. – С. 97–106. EDN: WODBFK
7. Никитина А.А. Использование проектной деятельности как метода обучения студентов вуза // Информационные и педагогические технологии в современном образовательном учреждении: материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2019. – С. 216–218. EDN: OBOGIO
8. Тарасова А.В. Проектная деятельность как инструмент совершенствования навыков научно-исследовательской деятельности студентов в вузе // Проектирование. Опыт. Результат. – 2024. – № 1. – С. 89–94. EDN: YHADPD
9. Дубровская Е.Н., Чуланова О.А., Куприянова Е.В. Мотивация преподавателей-наставников и студентов в проектной деятельности (на примере проекта «сквозные компетенции проектной деятельности» Сургут) // Материалы Ивановских чтений. – 2020. – № S4 (31). – С. 91–97. EDN: CEKUBF

10. Тюлю Г.М., Старшинов В.Н. Проектная деятельность как условие интеграции научно-исследовательской и учебной деятельности студентов в образовательном процессе вуза // Вестник Костромского государственного университета. Серия: Педагогика. Психология. Социокинетика. – 2016. – Т. 22. – № 2. – С. 172–175. EDN: WKOXYL
11. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова и др. – Самара: СамГТУ, 2010. – 271 с.
12. Study of modern software capabilities for complex shell analysis / M. Rynkovskaya, T. Elberdov, E. Sert, A. Ochsner // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2020. – Vol. 16. – № 1. – P. 45–53. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53 EDN: ZESCZG
13. Исследование напряженно-деформированного состояния композитной лопасти в ANSYS Workbench / К.А. Филиппова, Т.В. Аюшеев, Т.Ц. Дамдинова, Ц.Ц. Цыдыпов // Программные системы и вычислительные методы. – 2024. – № 2. – С. 41–52. DOI: <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2024.2.70712> EDN: XDTLCG
14. Rakesh J., Rajasekharan T. Experimental estimation and numerical comparison of fatigue strength of A356/SICP composite in T6 condition // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2024. – Vol. 38. – № 3. – P. 1209–1213. DOI: 10.1007/s12206-024-0118-9 EDN: RDWDZW
15. Analysis of stressed skin behaviour of a steel façade frame under varying structural conditions / T. Vatssev, A. Zorich, S. Rankovich et al. // International Journal of Steel Structures. – 2021. – Vol. 21. – № 1. – P. 178–201. DOI: 10.1007/s13296-020-00425-2 EDN: XPAWUV
16. Жучков А.Ю. Прочностной расчет и топологическая оптимизация вала коробки переключения передач гусеничной машины методом конечных элементов // Политехнический молодежный журнал. – 2023. – № 4 (81). DOI: 10.18698/2541-8009-2023-4-884 EDN: PIWXPW
17. Липатов А.С. Анализ прочности элементов конструкций из слоистых композитов // Политехнический молодежный журнал. – 2021. – № 3 (56). DOI: 10.18698/2541-8009-2021-3-683 EDN: GGULXN
18. Shipulin L.V., Frolov A.A., Shulezhko E.I. Experimental and finite element investigation of a scratch on the surface of a workpiece from a single abrasive grain // Journal of machinery manufacture and reliability. – 2023. – Vol. 52. – № 7. – P. 828–833. DOI: 10.1134/s105261882307021x EDN: CROJUZ
19. Макаров Ю.А., Ладошкин М.В. Оценка деформаций фундаментов на неоднородных грунтах в программном комплексе ANSYS Workbench // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 9 (105). – С. 308–315. EDN: TXQVXS
20. Макаров Ю.А., Зевайкин А.Е. Оценка деформаций балок на упругом винклеровском основании с помощью программного комплекса ANSYS Workbench // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 8 (92). – С. 133–141. EDN: QMRMYC

Поступила: 13.03.2025

Принята: 15.06.2025

UDC 378.14

DOI: 10.54835/18102883_2025_37_4

Experience in implementing a numerical modeling course in the framework of the discipline “project activity” for students of the direction “oil and gas business”

Petr V. Chepur¹,Cand. Sc., Associate Professor, Head of the Structural Mechanics Department
chepur_p_v@mail.ru**Alesya A. Kolyadko**²,Cand. Sc., Associate Professor
alesya2010-11@yandex.ru**Ilya S. Sukhachev**¹,Cand. Sc., Associate Professor
suhachevis@tyuiu.ru**Alexander A. Tarasenko**¹,Dr. Sc., Professor
a.a.tarasenko@gmail.com¹ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation² Branch of Tyumen Industrial University in Surgut,
38, Entuziastov street, Surgut, 628404, Russian Federation

The aim of the work is to demonstrate to a wide audience the experience of conducting project-oriented training for students in the field of “oil and gas business” using the example of solving the problem of calculating the strength of a vertical steel tank for storing oil numerically in the ANSYS program. The article outlines the relevance of using a project-oriented approach in the educational process of future engineers, and examines all stages of working with a project. Performing sketching and modelling operations, students develop a geometric model of the tank in accordance with the specified dimensions, create a finite element grid, set nonlinear properties of tank steel, introduce boundary conditions, set operational loads and impacts, establish contact interactions of various parts of the model, determine the necessary parameters for strength analysis, launch a solution to the problem, analyze and interpret the results obtained. To implement each action, the names of the corresponding commands and their location in the interface are specified in ANSYS. The paper presents graphical results of numerical simulation. The introduction of the numerical modeling course made it possible to strengthen the link between the disciplines preceding this course. In the course of the work, the students used the competencies of the disciplines of “metrology and standardization”, “resistance of materials”, “descriptive geometry” and “technical foreign language”. In conclusion, the authors noted the importance of the results of the integration of theoretical knowledge and practical skills in the proposed format, the importance of an interdisciplinary approach in the educational process and the ability to communicate with other students when working on a project. This course provides an opportunity to master modern tools for modeling engineering structures to solve complex engineering problems, which significantly increases the competitiveness of graduates in the labor market.

Keywords: engineering education, project-oriented approach, project activity, numerical modeling, ANSYS, tank, systems and critical thinking, teamwork

The authors appreciate anonymous reviewers for recommendations, which made the paper better.

REFERENCES

1. Milyaeva A.K., Mysin O.I., Vaganova O.I. Project-research activity in the educational process of higher education institution. *Problems of modern pedagogical education*, 2023, no. 81-1, pp. 92–95. (In Russ.) EDN: TBUCOC
2. Starodvortseva N.P., Kulikova M.G., Maslova K.S. Project activities of students of a technical university as an example of successful youth practice. *Energy, informatics, innovations - 2019. Collection of works of the IX International scientific and technical conference*. Smolensk, Universum Publ., 2019. Vol. 2, pp. 355–358. (In Russ.) EDN: ARTKZY
3. Rakhmanova Yu.K., Kargapol'tseva S.I. Project activities in a technical university. *Young scientist*, 2016, no. 11 (115), pp. 1527–1531. (In Russ.) EDN: WGGUYL

4. Crowley E.F., Malmqvist J., Ostlund S., Broder D.R. *Rethinking Engineering Education. The CDIO Approach*. Moscow, Higher School of Economics Publ., 2015. 504 p. (In Russ.)
5. Tsiurlnikova E.A. Special aspects of organizing project activities during professional training of students of the pedagogical institution of higher education. *Scientific notes of Oryol State University*, 2021, no. 4 (93), pp. 293–295. (In Russ.) EDN: KYEPWS
6. Teryushkova Yu.Yu. Features of the organization of project-research activities in a modern university. *Priority areas for the development of higher education in the Russian Federation: a collective monograph*. Ed. by A.Yu. Nagornova. Ulyanovsk, Zebra Publ., 2023. pp. 97–106. (In Russ.) EDN: WODBFK.
7. Nikitina A.A. Using project activities as a method of teaching university students. *Information and pedagogical technologies in a modern educational institution: materials of the X All-Russian scientific and practical conference*. Cherepovets, Cherepovets State University Publ., 2019. pp. 216–218. (In Russ.) EDN: OBOGIO
8. Tarasova A.V. Project activity as a tool for improving the skills of research activities of students at the university. *Design. Experience. Result*, 2024, no. 1, pp. 89–94. (In Russ.) EDN: YHADPD
9. Dubrovskaya E.N., Chulanova O.L., Kupriyanova E.V. Motivation of teachers-mentors and students in project activities (on the example of the project “cross-cutting competencies of project activities” Surgut). *Materials of the Ivanovo readings*, 2020, no. S4 (31), pp. 91–97. (In Russ.) EDN: CEKUBF.
10. Tyulyu G.M., Starshinov V.N. Project activities as a condition for the integration of scientific research and training students in educational process university. *Vestnik of Kostroma State University. Series: Pedagogy. Psychology. Sociokinetics*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 172–175. (In Russ.) EDN: WKOXYL
11. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A. *Engineering analysis in ANSYS Workbench*. Samara, Samara State Technical University Publ., 2010. 271 p. (In Russ.)
12. Rynkovskaya M., Elberdov T., Sert E., Ochsner A. Study of modern software capabilities for complex shell analysis. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2020, vol. 16, no. 1, pp. 45–53. DOI: 10.22363/1815-5235-2020-16-1-45-53 EDN: ZESCZG
13. Filippova K.A., Ayusheev T.V., Damdinova T.T., Tsidipov T.T. Investigation of the stress-strain state of a composite blade in ANSYS WorkBench. *Software systems and computational methods*, 2024, no. 2, pp. 41–52. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2024.2.70712> EDN: XDTLCG
14. Rakesh J., Rajasekharan T. Experimental estimation and numerical comparison of fatigue strength of A356/SICP composite in T6 condition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2024, vol. 38, no. 3, pp. 1209–1213. DOI: 10.1007/s12206-024-0118-9 EDN: RDWDZW
15. Vatsev T., Zorich A., Rankovich S. Analysis of stressed skin behaviour of a steel façade frame under varying structural conditions. *International Journal of Steel Structures*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 178–201. DOI: 10.1007/s13296-020-00425-2 EDN: XPAWUV
16. Zhuchkov A.Y. Strength calculation and topological optimization of the gearshift shaft of a tracked vehicle by the finite element method. *Polytechnic Youth Journal*, 2023, no. 4 (81). (In Russ.) DOI: 10.18698/2541-8009-2023-4-884 EDN: PIWXPW
17. Lipatov A.S. Strength analysis of structural elements made of laminated composites. *Polytechnic Youth Journal*. 2021, no. 3 (56). (In Russ.) DOI: 10.18698/2541-8009-2021-3-683 EDN: GGULXN
18. Shipulin L.V., Frolov A.A., Shulezhko E.I. Experimental and finite element investigation of a scratch on the surface of a workpiece from a single abrasive grain. *Journal of machinery manufacture and reliability*, 2023, vol. 52, no. 7, pp. 828–833. DOI: 10.1134/s105261882307021x EDN: CROJUZ.
19. Makarov Yu.A., Ladoshkin M.V. Evaluation of foundation deformations on heterogeneous soils using the ANSYS Workbench software package. *Engineering Bulletin of the Don*, 2023, no. 9 (105), pp. 308–315. (In Russ.) EDN: TXQVXS
20. Makarov Yu.A., Zevaikin A.E. Evaluation of beam deformations on an elastic Winkler base using the ANSYS Workbench software package. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022, no. 8 (92), pp. 133–141. (In Russ.) EDN: QMRMYC

Received: 13.03.2025

Accepted: 15.06.2025