



Столыпинский
вестник

Научная статья
Original article
УДК 532

**РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ДЛЯ
СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В РАКЕТНОЙ ТЕХНИКЕ**
CALCULATION OF THE MINIMUM WALL THICKNESS FOR HIGH-
PRESSURE VESSELS IN ROCKET TECHNOLOGY

Вершинин Денис Сергеевич, студент, Сибирский государственный университет науки и технологий, Россия, г. Красноярск

Марченко Светлана Валерьевна, студент, Сибирский государственный университет науки и технологий, Россия, г. Красноярск

Тетерин Андрей Витальевич, студент, Сибирский государственный университет науки и технологий, Россия, г. Красноярск

Щеглов Владимир Константинович, студент, Сибирский государственный университет науки и технологий, Россия, г. Красноярск

Vershinin Denis Sergeevich, e-mail: deniskin333@mail.ru

Marchenko Svetlana Valeryevna, e-mail: achi.trunaki@gmail.com

Teterin Andrey Vitalievich, e-mail: a01.27.2000.37@gmail.com

Shcheglov Vladimir Konstantinovich, e-mail: vladimir-scheglov@mail.ru

Аннотация

В данной статье рассмотрен алгоритм работы программы для определения максимального напряжения и минимально допустимой величины

толщины стенки для сосудов высокого давления в ракетно-космической технике. Рассмотрены сферы использования сосудов. Обусловлена актуальность создания модели расчета. Выведены выражения для радиусов кривизны и уравнения равновесия сосуда по безмоментной теории оболочек. При помощи метода сечений определены меридиональные продольные усилия, окружные погонные усилия. Произведен расчёт пригодности сосуда. Приводится пример расчета сосуда высокого давления, состоящего из трех различных секций методами безмоментной теории оболочек.

Annotation

In this article, the algorithm of the program for determining the maximum voltage and the minimum allowable wall thickness for high-pressure vessels in rocket and space technology is considered. The spheres of use of vessels are considered. The urgency of creating a calculation model is determined. Expressions for the radii of curvature and the equilibrium equations of the vessel according to the momentless theory of shells are derived. Using the cross-section method, the meridional longitudinal forces and circumferential linear forces are determined. The vessel's suitability has been calculated. An example of the calculation of a high-pressure vessel consisting of three different sections by methods of instantaneous shell theory is given.

Ключевые слова: сосуд высокого давления, безмоментная теория оболочек, строительная механика, метод сечений.

Keywords: high pressure vessel, instantaneous theory of shells, construction mechanics, cross-section method.

Сосуды высокого давления широко применяются в различных отраслях строительства и конструирования. Их используют в автоклавах (при производстве композиционных материалов), барокамерах, а также при производстве ядерных реакторов. (Рис. 1) [1]. Такое широкое применение обусловлено разнообразием размеров и технических характеристик [2].

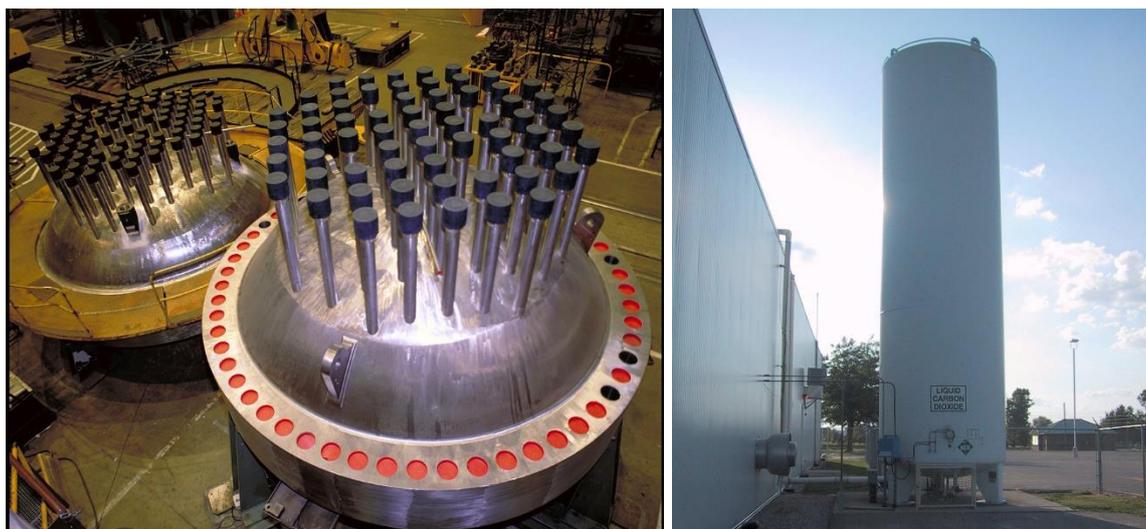


Рис. 1 - Применение сосудов высокого давления.

Из-за обширного использования, моделирование поведения сосуда, а именно определения напряжения и минимально допустимой оболочки является актуальной задачей.

При расчете таких элементов конструкций используется безмоментная теория оболочек. Она широко применяется при расчетах, позволяя в большинстве случаев получить простые решения.

Безмоментную оболочку можно рассматривать как приближенную модель реальной оболочки, если в последней не учитывать изгибающие и крутящие моменты; безмоментная теория оболочек — это приближенная теория расчета, не учитывающая изгибающих и крутящих моментов; замена реальной оболочки безмоментной недопустима, если ее срединная поверхность при заданном способе закрепления может изгибаться без растяжений и сдвигов.

При расчете оболочки по безмоментной теории принципиально важна правильная формулировка граничных условий. Безмоментная оболочка является расчетной схемой реальной оболочки и правильно отражает ее главные свойства только при определенных условиях загрузки или закрепления. Если на одном из краев оболочки заданы только силовые граничные условия, т. е. нет ограничений для перемещений, то можно поставить задачу о нахождении сил, используя только уравнения равновесия

и силовые граничные условия. Используя терминологию строительной механики, можно сказать, что безмоментная оболочка обладает внутренней статической определимостью. Статическая определимость, неопределимость или геометрическая изменяемость безмоментной оболочки как механической системы зависят в значительной степени от граничных условий на торцах.

Анализ полной системы уравнений показывает, что в безмоментной теории оболочек на каждом торце можно задавать только два тангенциальных граничных условия, в которые могут либо тангенциальные силы, либо тангенциальные перемещения.

Для облегчения этапа проектирования сосуда высокого давления была написана программа, которая рассчитывает пригодность сосуда для конкретного технического задания.

Для определения напряжения и минимально допустимой величины оболочки разобьем наш сосуд на отсеки, по формам, которые рассматриваются отдельно. Для каждого отсека введем свою систему координат. Запишем выражения для радиусов кривизны и уравнения равновесия для каждого отсека [3]. Определим меридиальные продольные усилия, а также окружные погонные усилия [4]. Весом оболочки пренебрегаем.

Начальными данными для ввода в программу служат (при условии, что сосуд (бак) имеет сложную форму (состоит из нескольких простых отсеков):

- Геометрические параметры простых частей (радиус и высота)
- Плотность транспортируемой жидкости
- Давление наддува в баке
- Информация о материале (предел прочности)
- Опоры (места крепления бака)
- Ускорение свободного падения

Получив входные данные, программа выполняет следующий алгоритм [5]:

1. Расчет методом сечения и геометрические параметры простых отсеков (расчет производится последовательно)
 - 1.1. Вычисление радиуса кривизны фигур
 - 1.2. Вычисление радиуса кривизны в широтном направлении
 - 1.3. Вычисление радиуса фигур в зависимости от переменной (высоты фигуры)
 - 1.4. Вычисление угла образующей верхней фигуры
2. Определение усилий, действующих на отсеки
 - 2.1. Вычисление гидростатического давления, действующего от отброшенной части отсека (давление на стенки отсека)
 - 2.2. Вычисление меридиального усилия в зависимости от глубины
 - 2.3. Вычисление окружного усилия в зависимости от глубины
 - 2.4. Вычисление эквивалентного усилия в зависимости от глубины
 - 2.5. Вычисление веса жидкости в объеме отсека, а также в зависимости от глубины
3. Построение графиков зависимости усилий от глубины для каждого отсека отдельно
4. Определение по графикам максимальных эквивалентных усилий
5. Вычисление минимальной толщины
6. Выбор минимальной толщины из посчитанных

Результатом работы программы является величина толщины, которая в свою очередь будет определять минимальную толщину стенки проектируемого сосуда высокого давления.

Для проверки работоспособности программы был проведен расчет сосуда высокого давления. Выходные данные (Рис. 2).

Дано:

$$D_{к1} = 2 \text{ м}$$

$$H_{к1} = 1 \text{ м}$$

$$H_{к2} = 2 \text{ м}$$

$$H_{к3} = 4,5 \text{ м}$$

$$D_{к3} = 1 \text{ м}$$

$$P_{\text{наддув}} = 5 \text{ атм}$$

Жидкость – жидкий водород

$$(\rho = 70 \text{ кг/м}^3)$$

Материал – алюминиевые сплавы

$$(\sigma = 45,6 \cdot 10^6 \text{ Па - предел прочности для АМгЗМ})$$

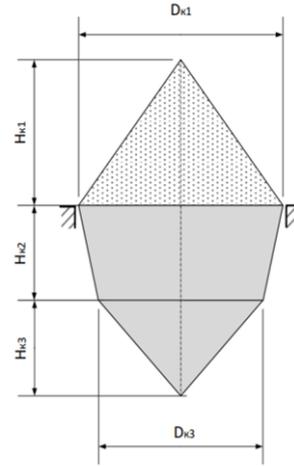
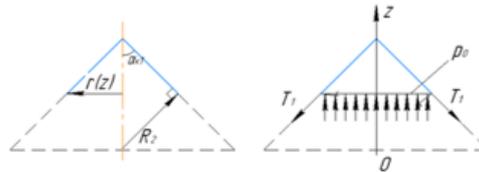


Рис. 2 - Пример.

Расчет верхнего конического отсека



Расчет усеченного конического отсека

Расчет нижнего конического отсека

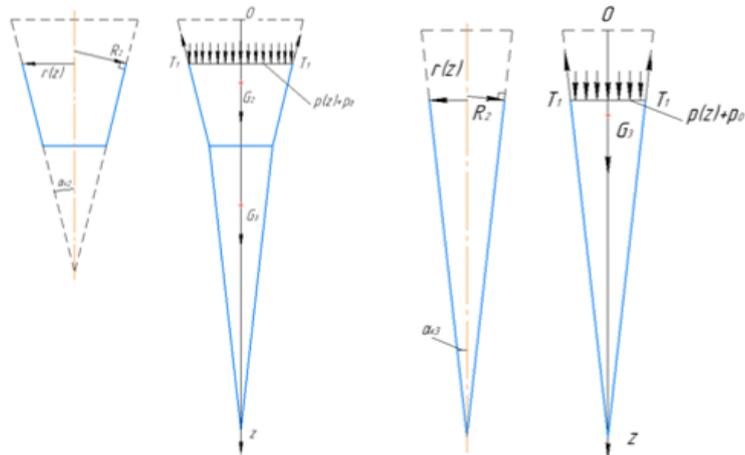


Рис. 3 – Разбиение на отсеки, расчет полученных фигур методом сечений.

По результатам работы программы определены графики зависимости усилий для отсеков от глубины, значения максимальных усилий и минимальных толщин (Рис. 4, 5, 6).

$$T_{max1} := 6.123724357 \cdot 10^5 \quad h_{mink1} := 0.001975394954$$

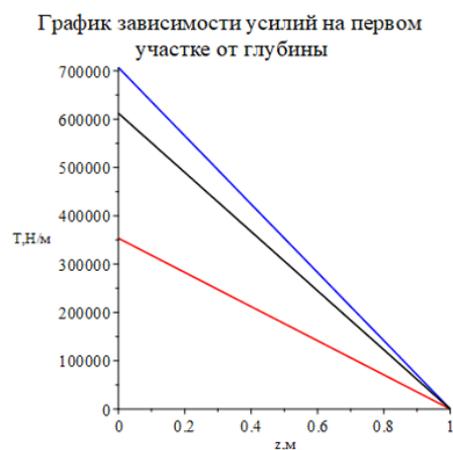


Рис. 4 - График зависимости усилий в верхнем коническом отсеке от z , где $T_{1к1}$ – красная; $T_{2к1}$ – синяя; $T_{эКВК1}$ – черная.

$$T_{max2} := 4.487913737 \cdot 10^5 \quad h_{mink2} := 0.001447714109$$

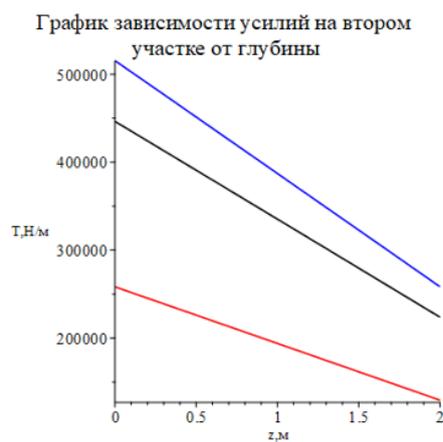


Рис. 5 - График зависимости усилий в усечённом конусе от z , где $T_{1к3}$ – красная; $T_{2к3}$ – синяя; $T_{эКВК3}$ – черная.

$$T_{max3} := 2.197833781 \cdot 10^5 \quad h_{min3} := 0.0007089786390$$



Рис. 6 - График зависимости усилий в нижнем коническом отсеке от z , где $T_{1к3}$ – красная; $T_{2к3}$ – синяя; $T_{эКВк3}$ – черная.

Расчет сосуда высокого давления показал, что наиболее нагруженным элементом является верхняя коническая часть СВД. Максимальное значение достигается на границе ($z=0$). Толщина в нижнем сечении будет определять толщину стенки всего сосуда. Минимальная толщина стенки составила 0,0019 метров. Как видно, программа показывает хорошую точность и может служить для предварительного этапа проектирования сосудов высокого давления.

Литература

1. В.А.Нестерова. Метод Бубнова-Галеркина. Лабораторный практикум по курсу «Численные методы механики», 2012.
2. Балабух Л. И., Алфутов Н. А., Усюкин В. И. Строительная механика ракет: Высшая школа, Москва, 1984. 392с.
3. В.А.Искрин. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: Учебник для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство». – М: Изд АСВ, 2004. – 424 с.
4. Сабиров Р. А. Основы теории и расчета оболочек. Безмоментные оболочки вращения. Сосуды высокого давления: учеб. пособие: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, Красноярск, 2006. 168с.

5. Михайловский Евгений Ильич Классическая линейная теория оболочек // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1. Математика. Механика. Информатика. 2006. №6.

Literature

1. V.A.Nesterova. The Bubnov-Galerkin method. Laboratory workshop on the course "Numerical methods of Mechanics", 2012.
2. Balabukh L. I., Alfutov N. A., Usyukin V. I. Construction mechanics of rockets: Higher School, Moscow, 1984. 392s.
3. V.A.Iskrin. The resistance of materials with elements of the theory of elasticity and plasticity: A textbook for students studying in the direction 653500 "Construction". – Moscow: Publishing House of the DIA, 2004. – 424 p.
4. Sabirov R. A. Fundamentals of theory and calculation of shells. Instantaneous shells of rotation. High pressure vessels: studies. manual: Sib. gos. aerospace. un-t, Krasnoyarsk, 2006. 168s.
5. Mikhailovsky Evgeny Ilyich Classical linear theory of shells // Bulletin of Syktyvkar University. Series 1. Mathematics. Mechanics. Computer science. 2006. №6.

© Вершинин Д.С., Марченко С.В., Тетерин А.В., Щеглов В.К., 2022 Научный сетевой журнал «СтолЫпинский вестник» №6/2022

Для цитирования: Вершинин Д.С., Марченко С.В., Тетерин А.В., Щеглов В.К. РАСЧЕТ МИНИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ ДЛЯ СОСУДОВ ВЫСКОГО ДАВЛЕНИЯ В РАКЕТНОЙ ТЕХНИКЕ// Научный сетевой журнал «СтолЫпинский вестник» №6/2022