



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ВОДОРОДА

Шампиева Альбина Тайшиковна
аспирант НИ ТПУ, г. Томск

26.11.2025



ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Цель: найти рациональные схемы намотки, обеспечивающие минимальную массу при запасе прочности $\geq 1,3-1,5$.

Задачи:

- Проверить схему при фиксированном угле ($\approx 54,4^\circ$);
- Применить метод оптимизации «Золотое сечение»;
- Применить метод оптимизации «Дифференциальная эволюция»;
- Учесть технологичность: дискретные углы, симметрия, паттерны.

Геометрия и материалы применяемые в расчетах

Параметр	Значение
Радиус R	0,144 м
Длина L	0,576 м
Давление P	70 МПа
Лейнер (HDPE)	$\rho = 940 \text{ кг/м}^3$, $t = 1 \text{ мм}$
Углепластик (Т700)	$\rho = 1550 \text{ кг/м}^3$, $t = 0,25 \text{ мм/слой}$
Критерий прочности	Цай–Хилл

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ

Метод	Особенности	Целевые функции/ограничения
Метод «Золотого сечения»	Однопараметрическая оптимизация толщины оболочки	min толщина оболочки
Дифференциальная эволюция (DE)	Эффективный метод глобальной оптимизации для непрерывных пространств	$M \leq 45-51$ кг; углы: свободные / дискретные / кратные 5°

Код реализован на Python с использованием библиотек `pyomo`, `scipy.optimize`, `numpy`, `pandas`, `matplotlib`.

БАЗОВЫЙ АНАЛИЗ: ФИКСИРОВАННЫЙ УГОЛ $\approx 54,4^\circ$



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ

$$\frac{\cos^2 \theta}{\sin^2 \theta} = \frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} = \frac{1}{2}$$

Отсюда:

$$\tan^2 \theta = 2$$

$$\Rightarrow \theta = \arctan(\sqrt{2}) \approx 54,44^\circ$$

Ограничение: $SF = 1,5$

Результат:

- 269 слоёв;
- масса = 82,2 кг;
- критическое разрушение — *растяжение матрицы поперёк волокон.*

Вывод:

Высокая масса из-за неравномерного использования прочности композита.

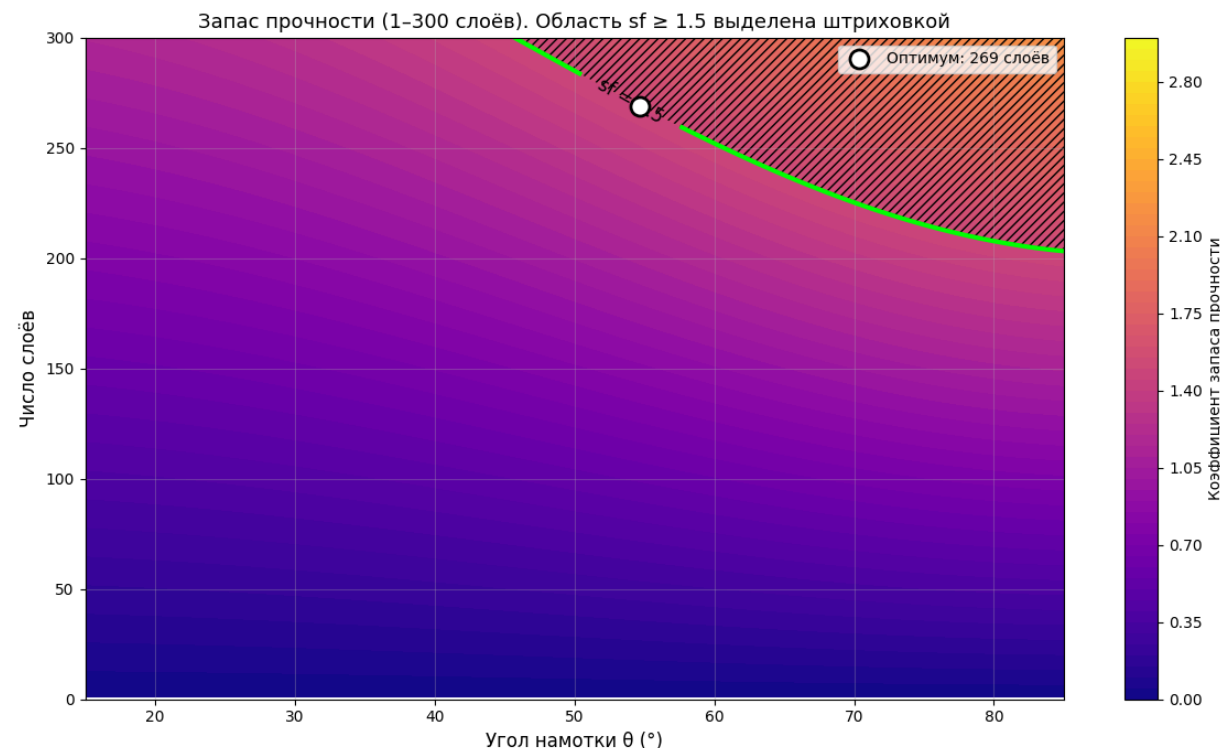


Рис.1 Зависимость угла намотки от количества слоев.

МЕТОД «ЗОЛОТОГО СЕЧЕНИЯ»



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ

Результаты:

Найденная толщина
оболочки $t_c = 5,57$ мм

Эквивалентное
число слоёв $n = 23$

Общая масса
(включая лайнер и
стальной экран) **17,94 кг**

Метод дал **массу в 4,6 раза меньше**, чем при угле $54,4^\circ$ — но модель **упрощена**:

- ✗ не учитывает межслойные сдвиги,
- ✗ не проверяется прочность по матрице,
- ✗ используется критерий **максимальных напряжений**, а не Цай–Хилл.

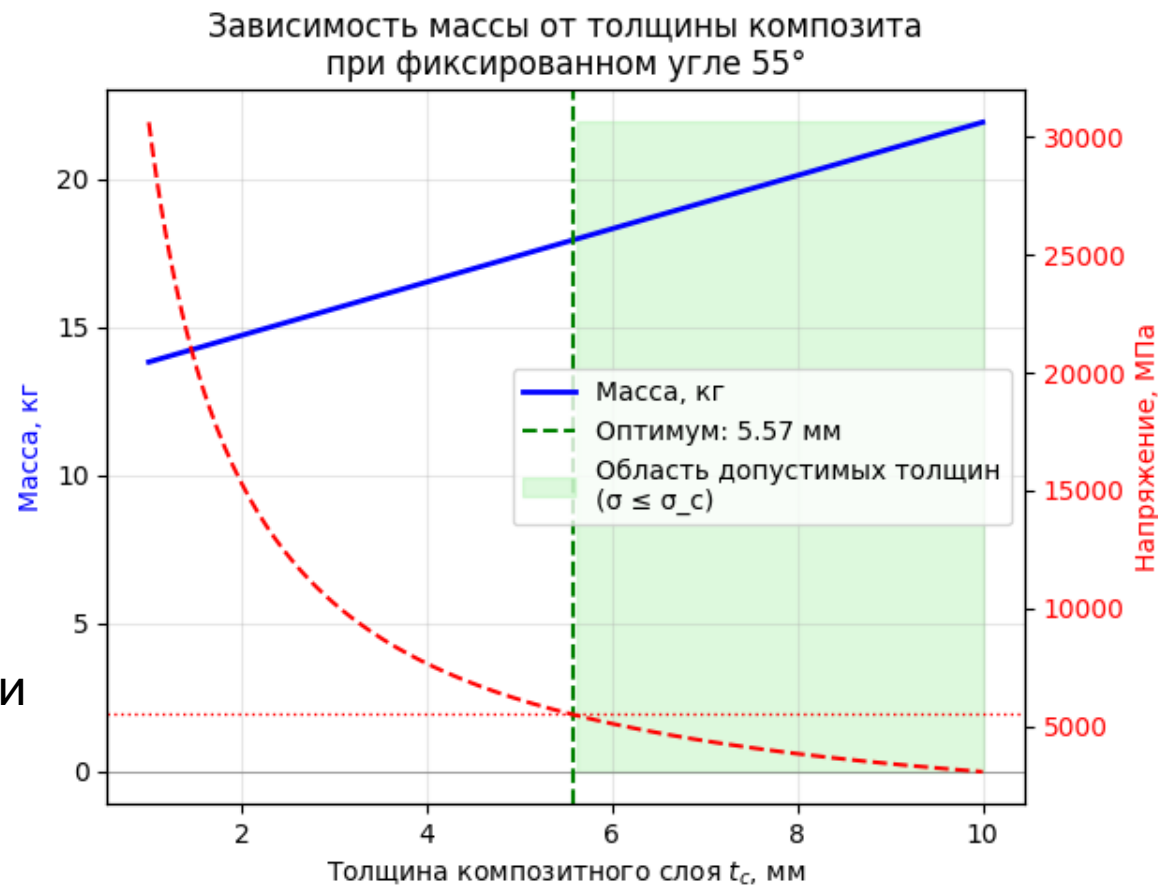


Рис.2 Парето для трех целей: масса, деформация, запас прочности.

DE, НЕПРЕРЫВНЫЕ УГЛЫ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ



Рис.3 График укладки с непрерывными углами

■ Ограничение по массе: ≤ 45 кг

Результат:

- $M = 44,5$ кг
- 174 слоя, углы от -90° до $+90^\circ$
- $SF_{\min} = 0,95$ — недопустимо
- Паттерн — хаотичный, нестабильный.
- Свободная оптимизация даёт непрочные и нетехнологичные решения.

Углы укладки (первые 50):

[18. 52.4 28. -31.2 74.9 57.4 18.4 80.5 -31.
53.8 -23.5 38.4 -30.5 -38.5 -53.4 -31.1 -38.8
41.9 36.3 -35.2 32.9 42.2 43.9 -41.4 -8.1
29.2 49.4 24. 55.8 -48.3 30.1 27.9 20.3 44.3
45.1 27.9 65.9 -33.8 38.3 -32.9 37.4 47.3
37.5 17.6 43.1 40.6 57.5 17.3 58.6 -24.3]

DE, ДИСКРЕТНЫЕ УГЛЫ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ

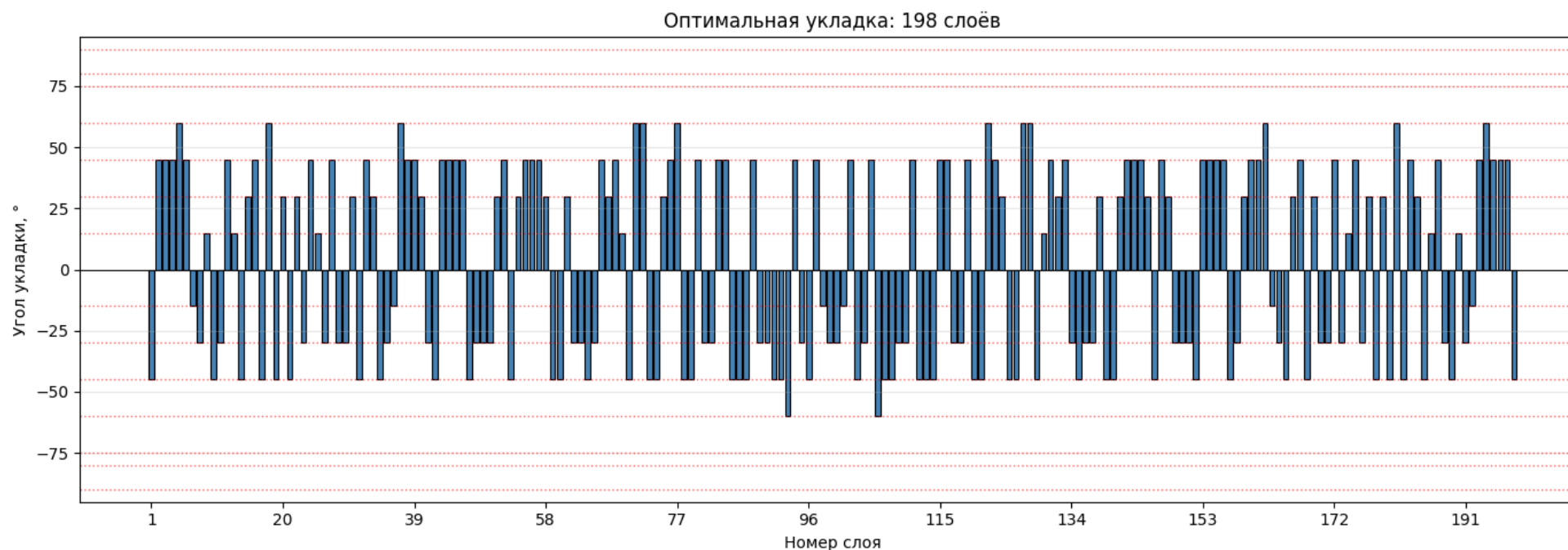


Рис.4 График укладки с дискретными углами

Дискретный набор углов укладки:

$\theta \in \{0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 80^\circ, \pm 90^\circ\}$

Результаты:

— $M = 50,6$ кг, $SF = 1,26$

— **198 слоёв**, паттерн: $[-45, 45, 45, 60, -15, \dots]$ — преобладают $\pm 30^\circ, \pm 45^\circ$

— Баланс: сдвиг + окружное напряжение.

— Технологично (станки работают с такими углами).

ВЫВОДЫ



- Теоретически «оптимальный» угол $\approx 54,4^\circ$ — не оптимален на практике
- Метод золотого сечения выполнил свою задачу как эффективный инструмент первичного скрининга
- Свободная оптимизация (DE с непрерывными углами) — опасна без ограничений
- Дискретные углы ($\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$ и др.) — компромисс: технологичность + надёжность
- Оптимизация должна быть *структурной*, а не *параметрической*
- Минимальная масса достигается не максимизацией нагрузки на материал, а *балансом* прочности, стабильности и технологичности.

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ**



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



ИНЖЕНЕРНАЯ
ШКОЛА ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ

Шампиева Альбина Тайшиковна

Аспирант НИ ТПУ, г. Томск

Email: shampiyevaat@mail.ru, ats3@tpu.ru

Тел: +7 (913) 843-68-18

**ОПТИМИЗАЦИЯ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО
ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ
ВОДОРОДА**

26.11.2025