

**МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ
РЕШЕНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ГАЗОНАПОЛНИТЕЛЬНЫХ
КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО
АЛГОРИТМА NSGA-II**

*Студент 2 курса магистратуры Алешин Артур Сергеевич, Уфимский
государственный нефтяной технический университет, Российская Федерация,
г.Уфа.*

**MULTI-CRITERIA OPTIMIZATION OF DESIGN SOLUTIONS FOR
AUTOMOTIVE GAS FILLING COMPRESSOR STATIONS USING THE NSGA-II
GENETIC ALGORITHM**

*2nd-year Master's student Aleshin Artur Sergeevich, Ufa State Petroleum
Technological University, Russian Federation, Ufa.*

Аннотация. Представлена методика многокритериальной оптимизации конструктивных решений автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) с использованием генетического алгоритма NSGA-II. Формализована задача оптимизации, включающая управляемые переменные трёх групп, систему ограничений и целевую функцию на основе свертки пяти частных критериев. Разработана структура хромосомы для кодирования вариантов решений. Приведены результаты вычислительных экспериментов для трёх сценариев размещения. Показано, что модульные решения доминируют в условиях ограниченной площади участка, а каскадное включение компрессоров снижает энергопотребление до 6 %.

Ключевые слова: автомобильные газонаполнительные компрессорные станции, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм, NSGA-II, Парето-фронт, модульные АГНКС, теория массового обслуживания.

Abstract. *A methodology for multi-criteria optimization of design solutions for automotive gas filling compressor stations (CNG filling stations) using the NSGA-II genetic algorithm is presented. The optimization problem is formalized, including controlled variables from three groups, a system of constraints, and an objective function based on the convolution of five partial criteria. A chromosome structure for encoding solution variants is developed. The results of computational experiments for three placement scenarios are presented. It is shown that modular solutions dominate under conditions of limited site area, while cascading compressor arrangement reduces energy consumption by up to 6%.*

Keywords: *automotive gas filling compressor stations, multi-criteria optimization, genetic algorithm, NSGA-II, Pareto front, modular CNG filling stations, queuing theory.*

В последнее десятилетие природный газ (метан) рассматривается как важнейшее альтернативное моторное топливо. По данным Международного Энергетического Агентства, мировой парк газомоторного транспорта превысил 28 млн единиц, а потребление сжатого природного газа (СПГ) продолжает расти в среднем на 3–4 % ежегодно [1]. Российская Федерация обладает крупнейшими в мире запасами природного газа, однако одним из главных сдерживающих факторов развития газомоторного рынка является недостаточно развитая сеть АГНКС.

Существующие станции, построенные по типовым проектам 80–90-х годов, часто не отвечают современным требованиям по пропускной способности, безопасности и экономической эффективности. Задача оптимизации конструктивных и архитектурно-планировочных решений АГНКС напрямую связана с повышением инвестиционной привлекательности строительства новых и реконструкции существующих станций [2].

Проектирование АГНКС как сложного инженерно-технологического комплекса повышенной опасности требует применения современных методов оптимизации, позволяющих перевести процесс принятия решений из области

эмпирических оценок в область точных расчетов и обоснованных компромиссов [3–5].

Для АГНКС управляемые переменные разделены на три группы:

планировочные и пространственные: координаты установки компрессорного блока $(X_{\text{comp}}, Y_{\text{comp}})$, координаты заправочных колонок $(X_{\text{col},k}, Y_{\text{col},k})$, угол ориентации технологической линии α , тип планировочной схемы (линейная, островная, комбинированная);

технологические и аппаратные: тип компрессорного агрегата (поршневой/винтовой), количество компрессорных агрегатов $n_{\text{comp}} \in [1,4]$, объём буферных емкостей $V_{\text{buf}} \in \{2,4,6,8,10\}$ м³, количество заправочных колонок $n_{\text{col}} \in [2,8]$, наличие системы рекуперации;

управляющие и режимные: порог включения резервного компрессора $\gamma \in [0,6; 0,9]$ (доля от максимальной нагрузки).

1.2. Система ограничений

Нормативно-технические ограничения включают противопожарные расстояния между оборудованием согласно СП 156.13130.2014 [6]:

$$d_{ij} \geq D_{ij}^{\min}$$

где d_{ij} – расстояние между объектами i и j , $D_{ij}^{\min}$ – нормируемое значение.

Технологические ограничения:

$$Q_{\text{comp}} \cdot T_{\text{work}} \geq k_{\text{res}} \cdot G_{\text{max}}$$

где Q_{comp} – производительность компрессорного блока, T_{work} – время работы, k_{res} – коэффициент резерва, G_{max} – максимальный суточный расход газа.

Ресурсные и экономические ограничения:

$$K \leq K_{\text{max}}, S \leq S_{\text{max}}$$

где K – капитальные затраты, S – занимаемая площадь.

1.3. Целевая функция

Целевая функция представляет собой аддитивную свертку пяти нормированных частных критериев:

$$F(X) = \sum_{k=1}^5 w_k \cdot f_k^{\text{norm}}(X) \rightarrow \max$$

Экономический критерий (минимизация суммарных приведенных затрат за расчетный период):

$$Z(X) = K(X) + \sum_{t=1}^T \frac{C_{op,t}(X)}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^T \frac{R_t}{(1+r)^t}$$

где $K(X)$ – единовременные капитальные вложения, $C_{op,t}(X)$ – эксплуатационные расходы в году t , R_t – доходы или ликвидационная стоимость, r – норма дисконта, T – горизонт расчета (10–20 лет).

Критерий пропускной способности и качества обслуживания (минимизация среднего времени ожидания):

$$f_2(X) = \frac{1}{1 + T_{ож}(X)/T_{доп}}$$

Критерий надежности (коэффициент технического использования):

$$f_3(X) = \text{КТИ}(X) = 1 - \sum_i t_{пр,i} \cdot \lambda_i$$

где $t_{пр,i}$ – среднее время восстановления i -го элемента, λ_i – интенсивность его отказов.

Критерий безопасности (интегральный риск):

$$f_4(X) = \frac{1}{1 + R(X)/R_{max}}, R(X) = \sum_i P_i(X) \cdot U_i$$

где $P_i(X)$ – вероятность i -го аварийного события, U_i – величина соответствующего ущерба.

Нормирование критериев выполнено по формулам:

$$\text{для максимизируемых: } f_k^{\text{norm}}(X) = \frac{f_k(X) - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}};$$

$$\text{для минимизируемых: } f_k^{\text{norm}}(X) = \frac{f_k^{\max} - f_k(X)}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}.$$

Весовые коэффициенты w_k определены методом анализа иерархий Т. Саати (табл. 1).

Таблица 1 — Весовые коэффициенты целевой функции для различных сценариев размещения АГНКС

Критерий	Сценарий А (город)	Сценарий Б (пригород)	Сценарий В (трасса)
Экономика (f_1)	0,25	0,35	0,40
Пропускная способность (f_2)	0,20	0,25	0,25
Надежность (f_3)	0,15	0,15	0,20
Безопасность (f_4)	0,30	0,15	0,10
Экология (f_5)	0,10	0,10	0,05

Для решения задачи выбран алгоритм NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) [7]. Выбор обусловлен

- способностью находить равномерно распределенные Парето-фронты
- невысокой вычислительной сложностью $O(MN^2)$, где M – число критериев, N – размер популяции;
- естественной поддержкой многокритериальности через механизмы Парето-ранжирования.

2.2. Кодирование переменных

Разработана структура хромосомы (табл. 2). Общая длина хромосомы $L=5+5+3 \cdot n_{\text{кол}}$, что для $n_{\text{кол}}=4$ составляет 22 гена.

Таблица 2 — Структура хромосомы для кодирования варианта конструктивного решения АГНКС

Группа переменных	Переменная	Тип кодирования
Планировочные	X_{comp}	Вещественное
Планировочные	Y_{comp}	Вещественное
Планировочные	$X_{\text{col},k}, Y_{\text{col},k}$	Вектор вещественных

Группа переменных	Переменная	Тип кодирования
Планировочные	α	Вещественное
Планировочные	Тип планировочной схемы	Категориальное
Технологические	Тип компрессора	Категориальное
Технологические	n_{comp}	Целое
Технологические	V_{buf}	Дискретное
Технологические	n_{col}	Целое
Технологические	Наличие рекуперации	Бинарное
Управляющие	γ	Вещественное

Этапы работы алгоритма

1. Инициализация начальной популяции ($N_{\text{pop}}=150$).
2. Оценка приспособленности — расчет $f_k^{\text{norm}}(X_i)$.
3. Недоминируемое ранжирование и сортировка по расстоянию до соседей.
4. Турнирная селекция ($k_{\text{tour}}=3$).
5. Генетические операторы:

– кроссинговер ($p_{\text{cross}}=0,85$): для вещественных переменных – арифметический $X_{\text{child}} = \alpha X_{\text{parent1}} + (1 - \alpha) X_{\text{parent2}}$, $\alpha \in [0,1]$;

– мутация ($p_{\text{mut}}=0,05$): добавление случайной величины $\delta \sim N(0, \sigma^2)$.

6. Формирование новой популяции с элитизмом.
7. Проверка условия останова ($\text{max_gen}=200$).

Учёт ограничений реализован методом штрафных функций:

$$F_{\text{penalty}}(X) = F(X) - \sum_j c_j \cdot \max(0, g_j(X))$$

Результаты вычислительных экспериментов.

Сценарии размещения.

Выделены три типовых сценария:

Сценарий А (городская черта): площадь участка 0,2–0,3 Га, уровень шума не более 45 дБА ночью;

Сценарий Б (пригородная зона): площадь 0,3–0,5 Га, уровень шума не более 55 дБА;

Сценарий В (загородная трасса): площадь 0,5–1,0 Га, шум не нормируется при удалении от жилья.

Для каждого сценария получены Парето-фронты из 20–25 решений. На рисунке 1 представлена эволюция популяции для городского сценария.

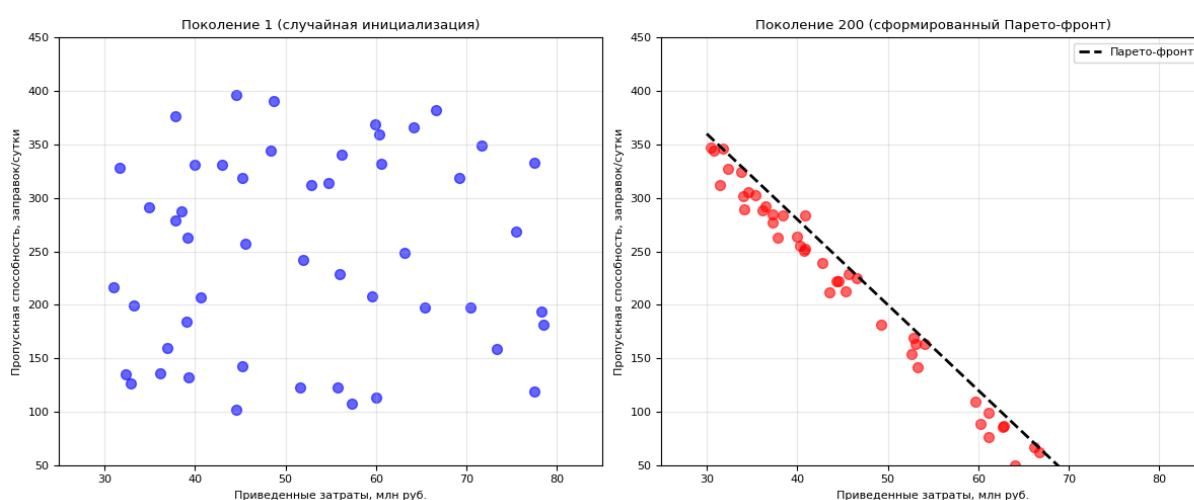


Рисунок 1 – Графические результаты

Для городского сценария выбрано компромиссное решение: CAPEX 34 млн руб., приведенные затраты 62 млн руб., пропускная способность 195 заправок/сутки, окупаемость 8,2 года. Это соответствует модульной АГНКС с 4 колонками, $V_{buf}=5 \text{ м}^3$ и шумопоглощающими кожухами.

Для пригородного сценария оптимальное решение: CAPEX 48 млн руб., окупаемость 6,5 лет, 5 колонок (3 легковых + 2 грузовых), $V_{buf}=8 \text{ м}^3$. Алгоритм показал, что модульные решения с возможностью масштабирования доминируют над стационарными.

Разработанный алгоритм формирует множество Парето-оптимальных альтернатив, предоставляя проектировщику и инвестору возможность выбора итогового варианта на основе формализованных предпочтений.

Список использованных источников

1. Sui P.-C., Feng X.-Y. Decision-making of compressed natural gas station siting for public transportation: Integration of multi-objective optimization, fuzzy evaluating, and radar charting // Energy. — 2017. — Vol. 140, Part 1. — P. 11-17.
2. Li Y., Wang X., et al. Bilevel Optimal Economic Dispatch of CNG Main Station Considering Demand Response // Energies. — 2023. — Vol. 16, № 7. — 3080.
3. Ростехнадзор. Протокол заседания Научно-технического совета № 03 от 12.09.2023 «О классификации АГНКС как ОПО III класса опасности».
4. Приказ Ростехнадзора от 15.12.2020 № 530 «Правила безопасности автогазозаправочных станций газомоторного топлива» (ФНП).
5. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов».
6. Ростехнадзор. Разъяснения по вопросам эксплуатации АГНКС и АГЗС от 23.06.2025.