

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА МЕТАЭВРИСТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ВВЕДЕНИЕ.

При проектировании установок по получению сжиженного природного газа (СПГ) одним из ключевых и наиболее капиталоемких элементов является теплообменное оборудование. Сокращение времени подбора и проектирования таких аппаратов, а также снижение их габаритов и металлоёмкости напрямую влияет на капитальные и эксплуатационные затраты криогенных установок. Наиболее распространённым и технологически гибким типом компактных теплообменников, используемых в криогенных схемах и установках СПГ, является пластинчато-ребристый теплообменник. Далее в работе все применяемые методы будут применяться к данному типу теплообменного оборудования.

Цель настоящей работы — выполнить сравнительный анализ ряда метаэвристических алгоритмов (PSO, GA, DE, SA, PSO-GA, ACO) применительно к задаче оптимального проектирования трёхпоточного пластинчато-ребристого теплообменника, используя в качестве целевой функции безразмерный критерий NEGU, объединяющий энтропийный и эксергетический подходы. Особенностью работы является одновременное рассмотрение многопоточного двухфазного режима, учёт температурной зависимости свойств по уравнению состояния GERG-2008 и сопоставление нескольких метаэвристических алгоритмов по критериям качества решения и вычислительных затрат.

Для данного исследования был взят трехпоточный ПТО. В котором поток Горячая сторона: 1 – природный газ; Холодная сторона: 2, 3 – смешанный хладагент (СХ), чьи составы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Молярные составы потоков

Поток	СН ₄ , %	С ₂ Н ₆ , %	С ₃ Н ₈ , %	С ₄ Н ₁₀ , %	N ₂ , %
1	94,60	2,61	0,65	0,65	0,98
2	17,87	34,66	35,51	11,50	2,46
3	39,42	31,81	16,07	2,91	9,78

В расчете для данных потоков были взяты следующие начальные характеристики, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. Параметры потоков на входе в теплообменник

Поток	Температура, К	Давление, кПа	Мольный расход, кмоль/ч	Массовый расход, кг/с	Паровая фракция
1	219,30	6650	3381,79	15,835	0,98
2	218,23	6000	4733,48	47,651	0
3	106,00	200	3753,51	28,513	0,07

В расчетах принимались следующие конструктивные параметры пластинчато-ребристого теплообменника: количество каналов для каждого потока $m_k = 10$; высота сечения канала (пластины) $h_k = 0,6$ м; расстояние между пластинами $\Delta = 0,01$ м; шаг оребрения $\delta = 0,006$ м; шаг вдоль потока $d_l = 0,04$ м; толщина стенки $\delta_s = 0,002$ м; материал стенки – алюминий. При работе алгоритма пластины подбирались на основе данных из открытых источников предприятий производителей данного оборудования.

В данном исследовании задаются граничные условия 1-го рода. Температуры и давление на входе в ПТО не изменяются. Для $T_{пр} \pm 5$ С

При расчётах приняты следующие допущения: режим работы теплообменника двухфазный; термодинамические свойства веществ зависят от температуры и определяются по уравнению состояния GERG-2008 и стандарту ГОСТ 30319.1-96; режим течения характеризуется критериями подобия (Рейнольдса, Нуссельта) и коэффициентом трения; модель строится на основе корреляций для коэффициента теплоотдачи и падения давления без явного решения задачи плёночной конденсации на стенке; переходные процессы внутри теплообменника не рассматриваются и предполагается установившийся режим; геометрия

каналов и распределение потока по каналам считаются заданными и равномерными, без учёта возможной неравномерности по параллельным каналам.

Для оптимизации были выбраны следующие алгоритмы: PSO-«метод роя частиц», GA-«генетический алгоритм», DE-«алгоритм дифференциальной эволюции», SA-«алгоритм имитации отжига», PSO-GA (объединяющий метод роя частиц и генетический алгоритм)», ACO-«алгоритм оптимизации методом муравьиной колонии для непрерывных областей». Каждый из этих алгоритмов является метаэвристическим, но с разной логикой реализации [1-7]. При анализе литературы, было выявлено, что обычно для поставленной оптимизации используют алгоритм PSO [1]. Полученные данные также будут проанализированы в сравнение с поставленной задачей.

Поскольку основной целью исследования является сравнение эффективности метаэвристических алгоритмов оптимизации, а не анализ динамики системы. То наибольшую оценку алгоритм будет получать за скорость работы, затем за значение параметра NEGU. В данном исследовании NEGU — безразмерный критерий, который объединяет расчет энтропии и эксергии

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ

По совокупности данных, представленных в таблице 3, алгоритм SA первоначально выделяется как наиболее эффективный по критерию компромисса между качеством найденного решения и временем вычислений. Однако детальный анализ траекторий сходимости показал, что в ряде запусков реализация SA попадала в бесконечный цикл, вследствие чего число итераций доходило практически до предельно допустимого значения, ограниченного лишь ресурсами вычислительной системы. Такой характер поведения указывает на методологическую особенность реализации данного алгоритма и приводит к искажению сравнения с другими методами. В связи с этим результаты SA в дальнейшем не учитывались при сравнительном анализе.

После исключения SA из выборки видно, что минимальное значение целевой функции достигается при использовании алгоритма DE, тогда как алгоритм PSO демонстрирует сопоставимое качество решения при значительно меньшем времени расчёта (разница превышает 4 с). При этом алгоритмы ACO и гибридный PSO-GA [9] также обеспечивают достижение близких к оптимальным значений целевой функции за относительно малое число итераций, но их суммарное время работы остаётся существенно выше, чем у PSO [10].

Таблица 3. Результаты работы теплообменника

Название алгоритма	NEGU	Время, с
SA	0.27	5.78
PSO	0.27	8.42
DE	0.2873	12.07
PSO-GA	0.2874	13.98
GA	0.2874	14.74

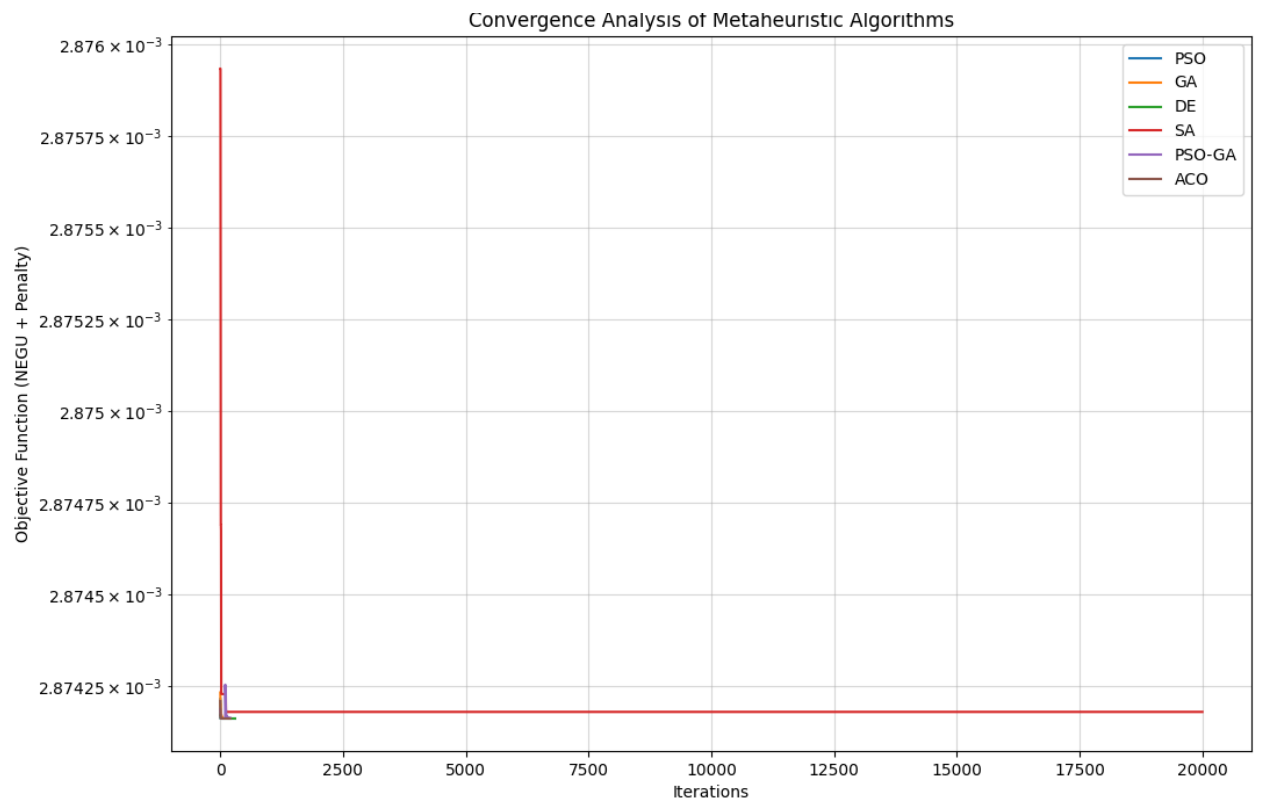


Рисунок 1 – Результаты работы всех алгоритмов

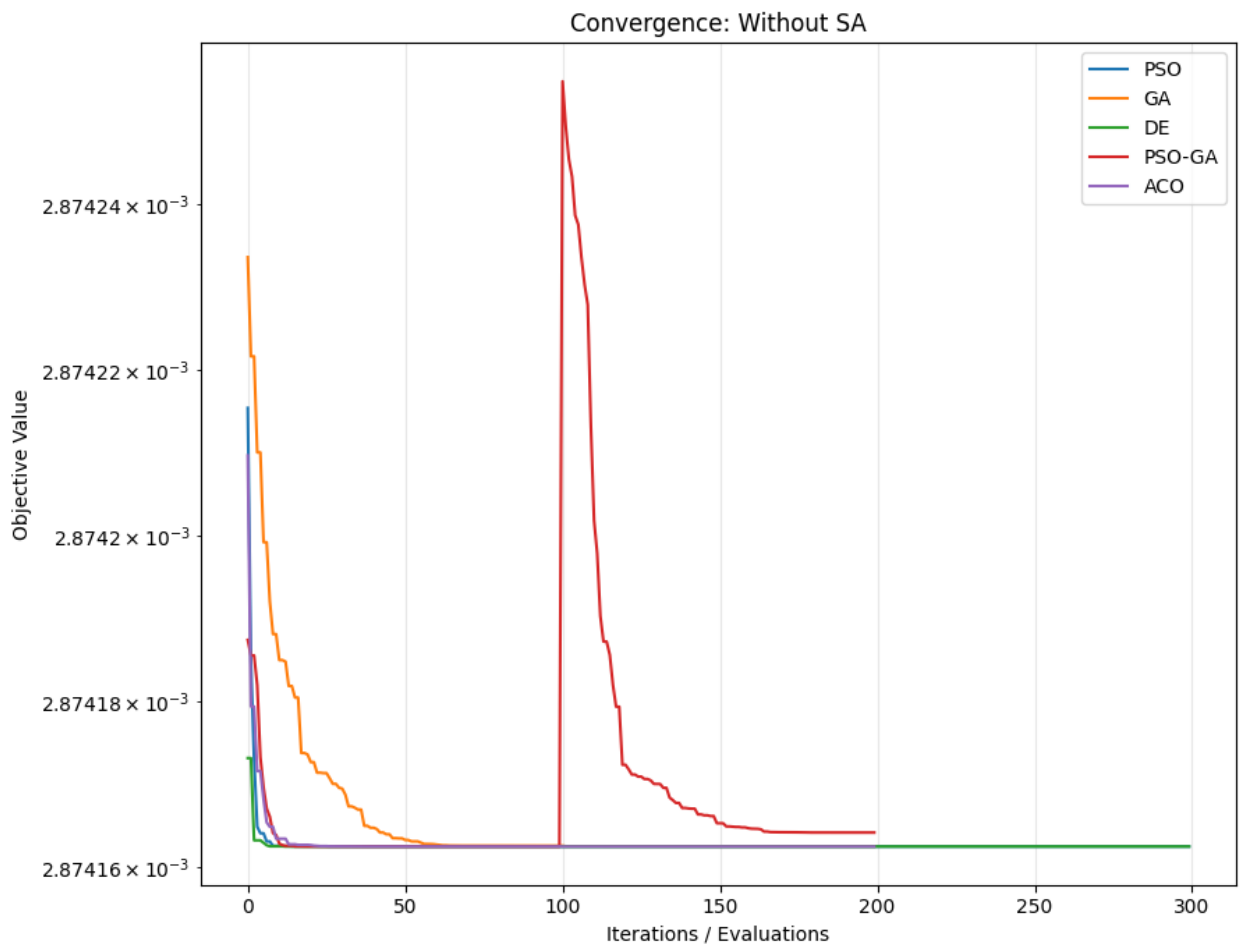


Рисунок 2 – Результаты работы алгоритмов без SA

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с точки зрения практического применения к оптимизации теплообменного аппарата наиболее сбалансированным по сочетанию качества решения и вычислительных затрат является алгоритм PSO, тогда как DE можно рассматривать как ориентир по достижимому уровню оптимальности при менее жёстких ограничениях на время.

СПИСК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Comparison of the performance of different metaheuristic methods Comparison of the performance of different metaheuristic methods for the design of heat exchangers // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2021. – Vol. 175. – P. 370–386. – DOI: 10.1016/j.cherd.2021.09.012.
2. Hybrid PSO–GA для пластинчато-ребристого теплообменника Design Optimization of a Plate Fin Heat Exchanger with Metaheuristic Hybrid Algorithm // *SSRN Electronic Journal*. – 2024. – 21 July. – DOI: 10.2139/ssrn.4901753.
3. Глобальная оптимизация прокладочных ПТО с переменными свойствами A new approach for the globally optimal design of gasketed plate heat exchangers with variable properties // *Chemical Engineering Science*. – 2023. – Vol. 280. – Art. 119067. – DOI: 10.1016/j.ces.2023.119067.
4. Многопоточные ПФТО в каскадной СПГ-установке Optimal design of multistream plate fin heat exchangers used in the cooling stage of a cascade LNG plant // *Proceedings of 16th International Heat Transfer Conference*. – 2018.
5. Оптимизация многопоточных ПФТО Design optimisation of multi-stream plate fin heat exchangers // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – Vol. 123. – P. 870–884. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.012.
6. Harris Hawks Optimization для прокладочных ПТО Insights into design parameters to improve gasketed-plate heat exchangers using Harris Hawks // *Chemical Engineering Transactions*. – 2025. – Vol. 115. – P. 13–18. – DOI: 10.3303/CET25115003
7. MINLP-метод для ПТО A New Computer-Aided Optimization-Based Method for the Design of Single Multi-Pass Plate Heat Exchangers // *LAPSE* – 2023. – Art. LAPSE-2023.2643.
8. Термодинамико-стоимостной анализ многопоточных ПФТО для СПГ Thermodynamic and operating cost analyses of multistream plate-fin heat exchangers in LNG processes // *Applied Thermal Engineering*. – 2022. – Vol. 214. – Art. 118699. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118699.
9. Сравнение метаэвристик для задач теплопередачи Solving the laminar boundary layer problem in heat transfer with metaheuristic algorithms // *Heliyon*. – 2023. – Vol. 9, No. 5. – e15123. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15123.
10. GA и PSO для теплообменников (обзорный характер) Genetic algorithm for the design and optimization of a shell and tube heat exchanger / [авт. не указаны, уточнить] // *Thermal Science*. – 2023. – Vol. 27, No. 6. – P. 2151–2168. – DOI: 10.2298/TSCI210601001X.