

УДК 621.564.3

Выбор методов оптимизации свойств хладоносителя для различных критериев оптимальности

Д-р техн. наук В. В. КИРИЛЛОВ, А. Е. СИВАЧЁВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Канд. физ.-мат. наук В. В. ЧАШНИКОВА

Санкт-Петербургский государственный университет
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

In the article one-criterion and multi-criteria task of optimizing the properties of the coolant to help choose the best composition for water-propylene glycol coolant electrolyte in terms of physico-chemical, thermal or technical-operational properties.

Key words: water-propylene glycol electrolyte coolant, optimization criteria, the heat transfer coefficient.

Ключевые слова: водно-пропиленгликолевый электролитный хладоноситель, критерии оптимизации, коэффициент теплоотдачи.

На сегодняшний день в холодильной промышленности, где используются установки с косвенным охлаждением, широко применяется большое количество различных по составу и параметрам хладоносителей (ХН).

Наиболее перспективными с точки зрения экологических, санитарно-гигиенических и эксплуатационных характеристик являются водно-пропиленгликолевые электролитные (ВПГЭ) хладоносители. Они хорошо себя зарекомендовали как по физико-химическим, так и теплофизическим свойствам [1, 2].

Ранее предлагались способы оптимизации таких параметров, как вязкость и теплоемкость а также других физико-химических и теплофизических свойств [3, 4]. Однако температура замерзания, коррозионная активность раствора и коэффициент теплоотдачи также являются важными выходными параметрами работы ХН.

Авторы продолжают изыскивать наиболее приемлемые математико-статистические методы оптимизации применительно к рассматриваемым системам хладоносителей.

Задачи по оптимизации свойств ХН можно условно разделить на три типа.

1. Оптимизация одного параметра при ограничениях на другие параметры и на вектор управляющих воздействий.

2. Минимизация или максимизация некоторой функции от нескольких параметров при задании допустимых интервалов значений этих параметров и при ограничениях на вектор управляющих воздействий. Такие задачи тоже являются однокритериальными. Отличие от первого типа состоит в том, что один и тот же параметр может входить и в функцию-критерий и в ограничения.

3. Многокритериальная оптимизация. Здесь ставится задача нахождения управляющего воздействия, которое обеспечивает удовлетворительное качество хладоносителей сразу по нескольким параметрам. При такой постановке решением является не точка в пространстве управлений, а некоторая его область.

Итак, под вектором управляющих воздействий понимается вектор $[y_1, y_2, y_3]$, где y_1 — концентрация электролита в растворе, моль/кг; y_2 — массовая доля пропиленгликоля (ПГ), %; y_3 — абсолютная величина температуры раствора, °С.

Область допустимых значений управляющих воздействий для всех типов задач в декартовых координатах представляет собой фигуру в трехмерном пространстве, ограниченную допустимыми значениями концентраций компонентов раствора, минимальной по модулю температурой и поверхностью-графиком функции модуля температуры замерзания на данном прямоугольнике. На рис. 1 показаны области допустимых значений в декартовых координатах.

Верхняя граница области — график функции модуля температуры замерзания, который рассчитывается по формуле

$$t_3 = 12,62y_1^2 - 0,206y_1y_2 - 5,274y_2^2 - 55,254y_1 + 61,423y_2 - 58,072,$$

полученной путем аппроксимации табличных значений температуры замерзания.

Зависимость оптимизируемых параметров от управляющих воздействий устанавливается экспериментальным путем и задается таблично (табл. 1).

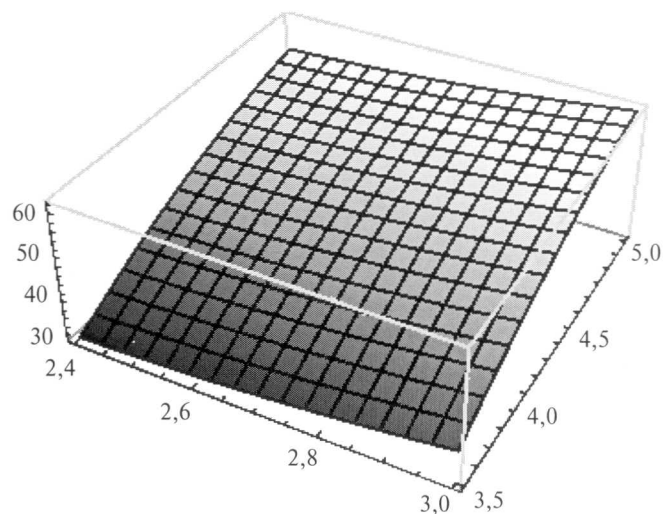


Рис. 1. Область допустимых значений компонента вектора управляющих воздействий

Эту зависимость можно аппроксимировать, например, полиномами от двух или трех переменных. Такой подход бывает эффективным, однако не во всех случаях. Например, если таблица значений оптимизируемых параметров невелика (от нескольких десятков до нескольких сотен значений) и мы имеем дело с задачей типа 2, то самым эффективным может оказаться простой перебор значений целевой функции по всей таблице и выбор такого управляющего вектора, который дал наибольшее (наименьшее) из этих значений.

Аппроксимация целесообразна не во всех случаях. В качестве конкретного примера рассмотрим максимизацию коэффициента теплоотдачи K_α (табл. 2) при ограничениях на теплопроводность — $\lambda \geq 0,304$ Вт/(м·К) и на массовую долю пропиленгликоля — $\omega \geq 40$ %. Зная плотность раствора, определяем коэффициент теплоотдачи при температуре -20 °С:

$$K_\alpha = \lambda^{0,57} C_p^{0,43} \rho^{0,8} \mu^{-0,37}.$$

Из табл. 2 выбираем минимальное значение коэффициента теплоотдачи и накладываем на него ограничения по массовой доле ω пропиленгликоля в растворе и по теплопроводности λ . Из таблицы видно, что коэффициент теплоотдачи монотонно убывает в заданной области как по координате y_1 , так и по координате $y_2 = \omega$. Кроме того, теплоемкость тоже монотонно убывает по обоим аргументам. Поэтому условный максимум находится на границе допустимой области (если таковая вообще существует при заданных ограничениях), т. е. при $\omega = 40$ %. На рис. 2 показан результат оптимизации.

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи

ω , %	C , моль/кг	K_α , Вт/(м ² ·К)
35	2,4	163,87
	2,6	148,90
	2,8	130,73
	3,0	—
40	2,4	159,51
	2,6	129,39
	2,8	101,63
	3,0	—
45	2,4	137,25
	2,6	112,40
	2,8	92,42
	3,0	—
50	2,4	120,79
	2,6	99,71
	2,8	80,76
	3,0	—

Из рис. 2 видно, что максимум K_α достигается при концентрации электролита 2,4 моль/кг. Однако это значение не входит в допустимую область по теплопроводности λ . Из допустимых вариантов максимальное значение K_α имеем при концентрации 2,6 моль/кг. Итак, оптимальной парой аргументов при $y_3 = t = -20$ °С и при заданных ограничениях является $y_1 = 2,6$ моль/кг; $y_2 = 40$ %, которой соответствует значение $K_\alpha = 101$ Вт/(м²·К).

Аппроксимация имеет смысл для более тонких расчетов, когда ожидаем экстремум целевой функции при некоторой промежуточной (не кратной 5 %) массовой доле ПГ или не кратной 0,2 моль/кг концентрации электролита. Тогда, если возможно, проводится дополнительный эксперимент, подтверждающий или опровергающий нашу гипотезу.

Наиболее эффективный результат может дать применение аппроксимации в задачах типа 1, где интересно выявить поведение целевых функций в заданной области, интервалы их монотонности, скорость роста и т. д. Например, если функция ведет себя монотонно по каждому управляющему параметру, то максимального и минимального значений она достигает на границе области, поэтому всю внутреннюю часть таблицы можно сразу исключить из рассмотрения.

В простейшем случае, когда нет ограничений на другие параметры, задачу, как и в предыдущем примере, можно решить простым перебором. При наличии ограничений на другие параметры иногда применяют метод условной оптимизации Лагранжа, как было показано в работе [3]. Если же имеет место монотонная зависимость оптимизируемого параметра от каждой компоненты управляющего вектора, то можно предложить другой способ.

Рассмотрим в качестве примера минимизацию скорости коррозии хладоносителя при условии, что концентрация электролита не менее 2,8 моль/кг. Как и в работе [3], используя данные табл. 1, аппроксимируем V полиномами второй степени от y_1, y_2 . Рассчитав коэффициенты методом наименьших квадратов, получаем расчетную формулу для определения скорости коррозии:

$$V = 0,0043y_1^2 + 0,00073y_1y_2 + 0,00006y_2^2 - 0,042y_1 - 0,00068y_2 + 0,1863.$$

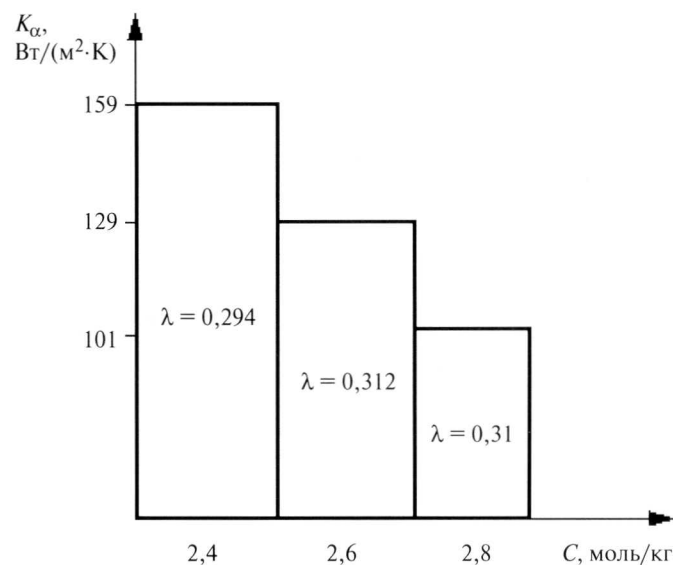


Рис. 2. Диаграмма значений коэффициента теплоотдачи для различных значений концентрации электролита при $t = -20$ °С и $\omega = 40$ %

Выводы

1. Установлено, что для оптимизации ХН по различным свойствам может быть применено множество математических методов. Так, для определения температуры замерзания с высоким содержанием пропиленгликоля (более 35 %) применяется метод оптимизации Лагранжа.

2. Впервые проведена аппроксимация свойств трехкомпонентных хладоносителей по коррозионной активности в зависимости от массовой доли ПГ и концентрации электролита при помощи метода исключения неизвестного.

Список литературы

1. *Кириллов В. В., Сивачев А. Е.* Основы создания и выбора хладоносителей с оптимальными свойствами для

систем косвенного охлаждения // ЭНЖ «Холодильная техника и кондиционирование», <http://refrigeration.open-mechanics.com>

2. *Бараненко А. В., Кириллов В. В.* Разработка хладоносителей на основе электролитных водно-пропиленгликолевых растворов // Холодильная техника. 2007. № 3.

3. *Кириллов В. В., Чашникова В. В.* Аппроксимация целевых функций для оптимизации параметров хладоносителя // Вестник МАХ. 2008. № 4.

4. *Кириллов В. В., Чашникова В. В., Сивачев А. Е.* Оптимизация свойств хладоносителя при помощи множеств Парето // Вестник МАХ. 2011. № 1.