

Оптимизация свойств хладоносителя при помощи множеств Парето

Д-р техн. наук В. В. КИРИЛЛОВ,

канд. физ.-мат. наук В. В. ЧАШНИКОВА, А. Е. СИВАЧЕВ, П. Д. СОКОЛОВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

A system-defined scientific approach has been found and formulated to optimize coolant properties. It is based on the construction of simulators with Pareto's optimal multitudes and binds up optimization factors and parameters. The method proposed can be applied to the selection of water-propylene glycol electrolyte coolants.

Key words: water-propylene glycol electrolyte coolant, Pareto's optimal multitudes, viscosity, freezing temperature.

Ключевые слова: водно-пропиленгликолевый электролитный хладоноситель, Парето-оптимальные множества, вязкость, температура замерзания.

Как известно, хладоноситель (ХН) — это промежуточное вещество, служащее для переноса теплоты от охлаждаемых объектов к холодильному агенту. Наиболее распространенными хладоносителями являются водные растворы неорганических и органических солей и спиртов. Улучшенными свойствами по сравнению с водно-пропиленгликолевыми (ВПП) и водно-солевыми ХН обладают электролитсодержащие водно-пропиленгликолевые хладоносители (ВППЭ). В их растворах протекает множество процессов, таких, как гидролиз, ионизация, сольватация и др. Эти процессы характеризуются большим числом факторов, взаимно влияющих друг на друга [1].

Опытные данные подтвердили теоретические предположения о возможности целесообразного изменения некоторых свойств ХН в лучшую сторону (уменьшение вязкости, снижение температуры замерзания, уменьшение коррозионного воздействия на металлы) посредством введения электролита в растворитель. Но, с другой стороны, в силу недостаточного развития теории сильных электролитов вообще и в смешанных растворителях в частности, всесторонний учет влияния факторов на физико-химические свойства хладоносителя трудно поддается детерминированному описанию с помощью термодинамических и критериальных уравнений [2].

Ранее рассматривалась оптимизация свойств ХН при помощи метода аппроксимации целевых функций двух параметров (вязкости и температуры замерзания) в водно-пропиленгликолевом хладоносителе, содержащем в качестве электролита хлорид натрия. В исследованиях впервые для задачи оптимизации свойств ХН был

показан метод наименьших квадратов для многочлена второй степени от нескольких переменных. К тому же с помощью линий уравнений вязкости и температуры замерзания была изыскана возможность выбора хладоносителя с низкой температурой замерзания и невысокой вязкостью [3].

Поэтому представляется целесообразным далее исследовать водно-органические электролитные системы методом многокритериальной оптимизации с построением Парето-оптимальных множеств.

Одни из характеристик хладоносителя, которые необходимо оптимизировать, — это вязкость μ , температура замерзания t_z и теплоемкость C_p . Поскольку при понижении температуры замерзания вязкость увеличивается, нам надо найти оптимальные соотношения между массовой долей ВПП растворителя, концентрацией хлорида натрия (NaCl) и температурой, при которых минимизируются оба свойства.

Существуют разные варианты решения данной задачи. Это оптимизация одного параметра с ограничением на другой, построение комбинированной целевой функции и др. Мы же воспользуемся методом многократной оптимизации.

Для задач многокритериальной оптимизации прежде всего должен быть задан набор решений (вариантов), из которого следует осуществлять выбор (табл. 1). Обозначим его X и будем называть множеством возможных решений. В нашем случае это множество всевозможных сочетаний концентраций NaCl, массовых долей и пропиленгликоля.

Исходные данные по оптимизации свойств ХН

Концентрация хлорида натрия, моль/кг	Массовая доля пропиленгликоля в ВПГ растворителя, %																			
	11,7				17,4				20,9				26				30			
	t_3 , °C	t_1 , °C	μ , Па·с	$C_{пр}$ Дж/(кг·К)	t_3 , °C	t_1 , °C	μ , Па·с	$C_{пр}$ Дж/(кг·К)	t_3 , °C	t_1 , °C	μ , Па·с	$C_{пр}$ Дж/(кг·К)	t_3 , °C	t_1 , °C	μ , Па·с	$C_{пр}$ Дж/(кг·К)	t_3 , °C	t_1 , °C	μ , Па·с	$C_{пр}$ Дж/(кг·К)
1,6	12,1	5	0,28	–	5,3	5	0,3	3,9	17	5	0,4	3,93	21,7	5	0,56	3,82	27	5	0,67	3,74
		10	0,34	3,9		10	0,5	3,90		10	0,78	3,79								
		15	–	3,9		15	0,6	3,86		15	0,10	3,75								
		20	–	–		20	–	–		20	0,15	3,71								
		25	–	–		25	–	–		25	–	–								
2,4	16,4	5	0,30	–	21,1	5	0,44	3,80	20,9	5	0,49	3,76	24,9	5	0,68	3,63	30,8	5	0,78	3,55
		10	0,38	3,77		10	0,62	3,73		10	0,92	3,60								
		15	0,46	3,74		15	0,62	3,70		15	0,11	3,57								
		20	–	3,70		20	0,91	3,66		20	0,15	3,53								
		25	–	–		25	–	–		25	–	–								
30	–	–	30	–	–	30	–	–												
3	19,8	5	0,32	–	23	5	0,46	3,64	25,4	5	0,58	3,60	27,2	5	0,81	3,48	32,3	5	0,91	3,43
		10	0,41	3,62		10	0,65	3,57		10	0,10	3,46								
		15	0,48	3,59		15	0,79	3,54		15	0,13	3,43								
		20	–	3,55		20	0,96	3,52		20	0,18	3,39								
		25	–	–		25	0,110	3,49		25	0,23	3,36								
30	–	–	30	–	–	30	–	–												
3,6	23,1	5	0,35	–	25,7	5	0,51	–	28,2	5	0,63	–	29,8	5	0,88	–	34	5	0,99	–
		10	0,44	–		10	0,58	–		10	0,71	–								
		15	0,52	–		15	0,71	–		15	0,84	–								
		20	0,62	–		20	0,85	–		20	0,107	–								
		25	–	–		25	0,102	–		25	0,120	–								
30	–	–	30	–	–	30	–	–												

Каждую такую пару концентраций будем называть «точкой», «вектором» или «возможным решением», в данном контексте это синонимы. Далее вводим несколько целевых функций, например вязкость и температуру замерзания, которые мы должны минимизировать. Затем определим на множестве возможных решений отношения предпочтения. Минимальное число элементов этого множества — два (для того, чтобы действительно был выбор). Ограничений на количество решений нет, оно может быть как конечным, так и бесконечным. При этом природа самих решений не играет никакой роли [4].

Процесс выбора невозможен без наличия того, кто осуществляет этот выбор, преследуя свои цели. Человека (или целый коллектив, подчиненный достижению определенной цели), который производит выбор и несет полную ответственность за его последствия, называют лицом, принимающим решения (ЛПР).

Обычно считается, что выбранным (наилучшим) является такое возможное решение, которое наиболее полно удовлетворяет желаниям, интересам и целям данного ЛПР. Стремление ЛПР достичь определенной цели нередко в математических терминах удается выразить в виде максимизации (или минимизации) некоторой числовой функции, заданной на множестве X . Однако в более сложных ситуациях приходится иметь дело не с одной, а с несколькими функциями. В зависимости от содержания задачи выбора эти функции f_1, f_2, \dots, f_m , $m \geq 2$ называют критериями оптимальности, критериями эффективности, целевыми функциями, показателями или критериями качества.

Задачу выбора, содержащую множество возможных решений X и векторный критерий f , обычно называют многокритериальной задачей.

Рассмотрим два возможных решения x' и x'' . Предположим, что после предъявления ЛПР этой пары решений оно выбирает (отдает предпочтение) первое из них. В этом случае пишут $x' \succ_X x''$. Знак \succ_X служит для обозначения предпочтений данного ЛПР и называется отношением строгого предпочтения.

Следует отметить, что не всякие два возможных решения x' и x'' связаны соотношением $x' \succ_X x''$ либо соотношением $x'' \succ_X x'$. Иначе говоря, не из любой пары решений ЛПР может сделать окончательный выбор. Вполне могут существовать такие пары, что ЛПР не в состоянии отдать предпочтение какому-то одному решению этой пары, даже если это пара различных решений. Описанная ситуация вполне соответствует реальному положению вещей. Более того, можно подчеркнуть, что в случае умения ЛПР из двух возможных решений предпочесть одно другому, то теория, построенная на указанном «жестком» требовании ЛПР, не представляла бы практического интереса.

Отношение предпочтения \succ_X , заданное на множестве возможных решений, естественным образом:

$f(x') \succ_Y f(x'') \Leftrightarrow x' \succ_X x''$ для $x', x'' \in X$ индуцирует (порождает) отношения предпочтения \succ_Y на множестве возможных векторов Y . Тем самым вектор $y' = f(x')$ является предпочтительнее вектора $y'' = f(x'')$ (т. е. $y' \succ_Y y''$) тогда и только тогда, когда решение x' предпочтительнее решения x'' (т. е. $x' \succ_X x''$). Таким образом, сформулируем все основные элементы задачи многокритериального выбора. Постановка всякой задачи многокритериального выбора включает:

- множество возможных решений X ;
- векторный критерий f ;
- отношение предпочтения \succ_X , заданное на множестве возможных решений.

Точка X предпочтительнее Y , если в X обе целевые функции принимают меньшие значения, чем в точке Y . Следует отметить, что не всякие два возможных решения X и Y связаны отношением предпочтения, иначе говоря, не из любой пары решений можно сделать окончательный выбор. Но если точка X будет предпочтительнее Y , то решение Y ни при каких обстоятельствах не может оказаться выбранным. И его можно исключить из последующего учета в процессе принятия решений. Исключение всех подобного рода решений приводит к множеству Парето [5, 6].

Рассмотрим оптимизацию по нашим трем параметрам — t_3, μ, C_p (табл. 2). Суть предлагаемого способа заключается в следующем. Рассмотрим первую точку и автоматически считаем ее Парето-оптимальной. Начинаем проходить оставшиеся точки. Сравнивая первую точку, мы можем иметь три варианта решения:

- вторая точка проигрывает первой по всем трем параметрам (тогда мы отбрасываем ее);
- вторая точка «хуже» первой по определенным параметрам, а по каким-то другим выигрывает. Тогда мы считаем Парето-оптимальной и эту точку;

— третий случай состоит в том, что вторая точка по рассматриваемым параметрам подходит нам лучше первой. Тогда вторую считаем Парето-оптимальной, а первую — нет. Ей присваиваются заранее невыгодные значения ($t = -1, \mu = 100$), чтобы при повторном прохождении цикла она не вошла в Паретовское множество [7].

В итоге получаем множество оптимальных результатов из 9 точек. В основном это случаи для температуры минус 15 °С.

Подобным образом рассмотрим оптимизацию по двум параметрам (табл. 3, рисунок). За критерии эффективности возьмем температуру замерзания и вязкость, потому что именно эти два параметра в наибольшей степени влияют на свойства хладоносителя при его эксплуатации в холодильных установках с косвенным охлаждением.

На рисунке представлены линии уровня вязкости μ при температуре минус 15 °С и линии температуры замерзания t_3 .

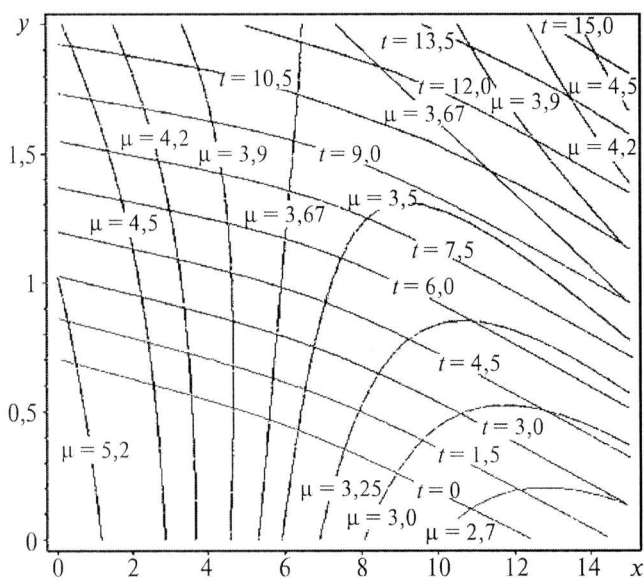
Парето-оптимальные точки по трем параметрам

NaCl	ПГ	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	$C_p, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
1,60	17,40	-15,30	3,72	3,98
2,40	17,40	-21,10	4,00	3,80
1,60	20,90	-17,20	4,46	3,93
3,00	17,40	-23,00	4,60	3,64
1,60	26,00	-21,70	5,60	3,82
3,00	20,90	-25,40	5,83	3,60
1,60	30,00	-27,00	6,70	3,74
2,40	30,00	-30,80	7,85	3,55
3,00	30,00	-32,30	9,10	3,43

Таблица 3

Парето-оптимальные точки (отбор по двум параметрам)

NaCl	ПГ	$t_3, ^\circ\text{C}$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$
1,60	11,70	-12,10	2,83
2,40	11,70	-16,40	3,01
2,40	30,00	-30,80	7,85
3,00	11,70	-19,80	3,29
3,00	30,00	-32,30	9,10
3,60	11,70	-23,10	3,56
3,60	17,40	-25,70	5,16
3,60	20,90	-28,20	6,34
3,60	30,00	-34,00	9,90



Зависимость вязкости ВПГЭ (NaCl) от температуры
(x — температура, $^\circ\text{C}$; y — концентрация, моль/кг)

Из рисунка видно, что в этом квадрате действительно сосредоточились минимальные значения вязкости, значения же температуры замерзания — средние. Возможно, сюда попали не все оптимальные точки, так как данный график не учитывает вариант с максимально низкой температурой замерзания, но большинство решений находится в этом квадранте.

Итак, решения сосредоточиваются в правой нижней части графика (либо на правой границе).

Исследования показали, что большинство точек, оптимальных по двум критериям, сосредоточены в одной области. Из этого мы можем сделать вывод, что оптимальные результаты будут достигаться в заданной области при температуре минус $15\text{ }^\circ\text{C}$, так как с понижением температуры вязкость растет, а температура замерзания в каждом подмножестве конкретной концентрации остается неизменной. Кроме того, мы можем констатировать, что большинство оптимальных решений достигается либо за счет минимальной вязкости, либо за счет минимальной температуры замерзания.

Список литературы

1. Бараненко А. В., Кириллов В. В. Разработка электролитсодержащих пропиленгликолевых хладоносителей — эффективный способ улучшения их свойств // Холодильная техника. 2006. № 1.

2. Бараненко А. В., Кириллов В. В., Бочкарев И. Н. Использование математико-статистического метода для выбора электролитсодержащего водно-пропиленгликолевого хладоносителя // III межд. научно-техн. конф. «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». Тезисы докл. — СПб.: СПбГУНиПТ, 2007.

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

4. Кириллов В. В. Расчетные зависимости вязкости водно-пропиленгликолевых растворов электролитов применительно к разработке хладоносителей с прогнозируемыми свойствами // Вестник МАХ. 2006. № 2.

5. Аоки М. Введение в методы оптимизации. — М.: Наука, 1977.

6. Демьянов В. Ф. Условия экстремума и вариационное исчисление. — М.: Высш. шк., 2005.

7. Полак Э. Численные методы оптимизации. — М.: Мир, 1974.