

УДК 621.565.93/94

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ВОЗДУШНЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СИСТЕМАХ С ЦЕЛЬЮ ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ РЕШЕНИЙ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

С.В. Федосов,

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет»

В статье обосновывается целесообразность применения метода анализа иерархий в процессе моделирования параметров теплообмена в испарительно-конденсационном блоке воздушной теплонасосной системы. В данном исследовании метод анализа иерархий реализуется через использование метода экспертных оценок, что повышает качество получаемых результатов и выводов. Многокритериальный анализ позволил установить взаимосвязь между основными термодинамическими и теплофизическими параметрами, которые оказывают существенное влияние на повышение интенсивности теплообмена в испарительно-конденсационном блоке при выборе эффективной энергосберегающей модели ВТНС. Расчет критериев и приоритетов осуществлялся четырьмя методами, предложенными Т. Саати, и отличающимися сложностью и точностью вычислений, но приводящие к единому результату.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, экспертные оценки, воздушная теплонасосная система, испарительно-конденсационный блок, энергоресурсоэффективность, интенсивность теплообмена

Введение

Предлагаемая работа показывает, что на большом материале, взятом из разных отраслей строительного производства, относительно простыми математико-статистическими средствами можно решать многие сложные задачи. Примеры подобраны таким образом, чтобы пользователь, если он имеет даже небольшие знания по математике, мог легко понять материал и без затруднений сам произвести необходимые расчёты.

В данном случае статистика лишь помогает обнаружить источники и виды ошибок в производственном процессе, а как их устранить в каждом конкретном случае может решить только опытный, хорошо осведомлённый в данном рабо-

чем процессе практик, т.е. лицо принимающее решение (ЛПР).

В этой связи задача совершенствования испарительно-конденсационного блока воздушной теплонасосной системы (ВТНС) является крайне актуальной. Для её решения необходимо проанализировать термодинамический цикл и рамки его изменений, а также систему нестационарного теплообмена, раскрывающего теоретическую суть самих процессов, так как эти процессы динамичны и сильно зависят от изменяющихся параметров окружающей среды.

При обосновании факторов, влияющих на теплоэнергетическую эффективность ВТНС, имеем ввиду взаимосвязь и приоритет теплообмена в

системе фреонового контура испарительно-конденсационного блока.

Взаимосвязь – это скрытая теплота парообразования, как количество теплоты, которую поглощает кипящая жидкость при переходе из жидкой фазы в пар – (испарение) или отдача при переходе из паровой фазы в жидкую – конденсация.

Приоритет – это весомое влияние на ВТНС составляющих: окружающей среды, рабочего тела, теплоносителя на термодинамическую активность испарительно-конденсационного блока в условиях неравновесного процесса.

Цель – определение значимости факторов, влияющих на теплоэнергетическую эффективность ВТН, для повышения энергоресурсоэффективности или интенсификации тепломаассопереноса (жидкий фреон в испарителе преобразуется в газ, который поступает в компрессор и далее через конденсатор отдает тепло по коммуникациям в помещение).

Математическое моделирование проводимых процессов является важным инструментом для выбора энергоресурсосберегающих технических решений и является методологическим инструментом для разработки теоретических основ эффективных термодинамических процессов, протекающих в испарительно-конденсационном блоке ВТНС.

Применение метода анализа иерархий [7], как математического инструмента прогнозирования системного подхода, необходимого для анализа сложных проблем при поддержке принятия управленческих решений. Использование данного метода позволяет лицу, принимающему решения, в интерактивном режиме найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом согласуется с его пониманием сути проблемы и требованиями к её решению. Обоснованность применения метода анализа иерархий заключается в том, что в процессе моделирования тепломаассопереноса в испарительно-конденсационном

блоке ВТНС, необходимо определять основные параметры моделирования, для чего следует расставить приоритеты.

Известно, что на теплоэнергетическую эффективность ВТНС влияет множество факторов: параметры окружающей среды, влажность, объём воздуха, теплофизические свойства теплоносителя, рабочего тела, и другие.

Среди этих параметров необходимо выявить приоритетные, исследование которых позволит достичь поставленной цели – совершенствование (модернизация) испарительно-конденсационного блока ВТНС.

В данном исследовании метод анализа иерархий реализован через метод экспертных оценок – как разновидность более качественных исследований, в котором респондентами являются эксперты – специалисты в определенной области деятельности.

Отличительная особенность метода состоит в том, что он предполагает компетентное участие экспертов (экспертизу) в анализе и решении проблем исследования.

Основываясь на интуитивно-экспериментальном подходе, согласно трехконтурной конфигурации ВТНС выделяем три группы теплофизических параметров, оказывающих влияние на ее теплоэнергетическую эффективность.

Группа 1. Теплофизические параметры контура окружающей среды – «воздух-испаритель»:

- ✓ температура,
- ✓ влажность,
- ✓ объем.

Согласно нормативным документам установлены оптимальные и допустимые параметры воздуха [5,6,7]. К ним относятся температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Данные показатели обеспечивают необходимый микроклимат в помещении.

Показатель скорость, измеряемый в м/с, был заменен авторами на показа-

тель объема в м³/час, так как нагляднее отражает приток свежего воздуха в ВТНС.

Группа 2. Теплофизические параметры контура рабочего тела – «фреоновый компрессионный цикл»:

- ✓ температура кипения (теплопроводимость рабочего тела),
- ✓ давление (плотность) в испарителе,
- ✓ механическое сопротивление в магистрали,
- ✓ температура конденсации,
- ✓ теплота фазового перехода,
- ✓ структура потоков в магистралях теплообменников (толщина стенок или скорость потока).

Предлагаемые показатели теплоэнергетической эффективности рабочего тела, окружающей среды и теплоносителя определённым образом влияют на интенсивность тепломассопереноса в контуре испарительно-конденсационного блока ВТНС.

Группа 3. Теплофизические параметры контура теплоносителя – «конденсатор-отапливаемое помещение»:

- ✓ плотность,
- ✓ химический состав,
- ✓ температура кипения,
- ✓ объем.

Правильная работа отопительной системы воздушного теплового насоса напрямую зависит от характеристик теп-

лоносителя. В этом качестве в российских регионах с суровыми климатическими условиями лучше всего использовать жидкостный теплоноситель. Выбор типа теплоносителя (вода, антифриз или другой тип рассола) напрямую зависит от температуры окружающей среды.

При выборе параметров рабочего тела, предлагаемые эксперты, руководствовались ранее проведенными исследованиями, подробные результаты которых представлены в статьях [1,2].

Располагая следующими показателями (факторами) и используя их значения при расчёте метода анализа иерархий (метод экспертных оценок), поэтапно решаем следующие взаимосвязанные задачи:

- ✓ построение иерархической структуры проблемы;
- ✓ оценка значимости показателей для каждого уровня иерархии;
- ✓ сравнение имеющихся альтернатив и выбор наилучшей из них.

На первом этапе производится анализ проблемы принятия решений, который включает цель, критерии, альтернативы и другие рассматриваемые факторы, влияющие на выбор.

Результатом данного этапа является построение иерархической структуры для каждого контура ВТНС, которые представлены на рис. 1, 2, 3.

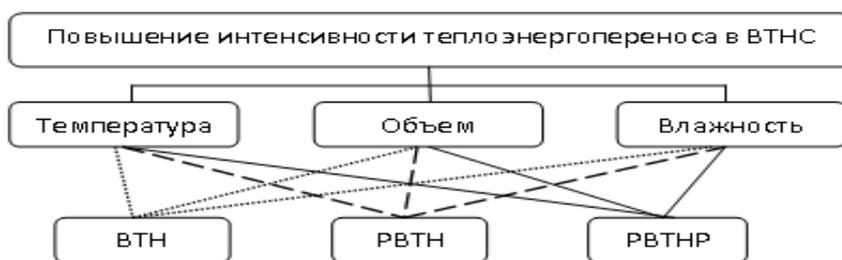


Рис. 1 Структура иерархии повышения энергоэффективности ВТНС для контура «воздух-испаритель»

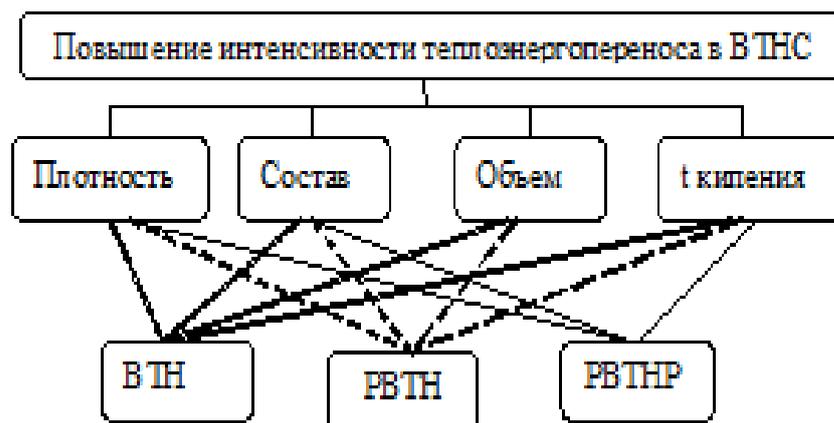


Рис. 2 Структура иерархии повышения энергоэффективности ВТНС для контура «конденсатор-отапливаемое помещение»

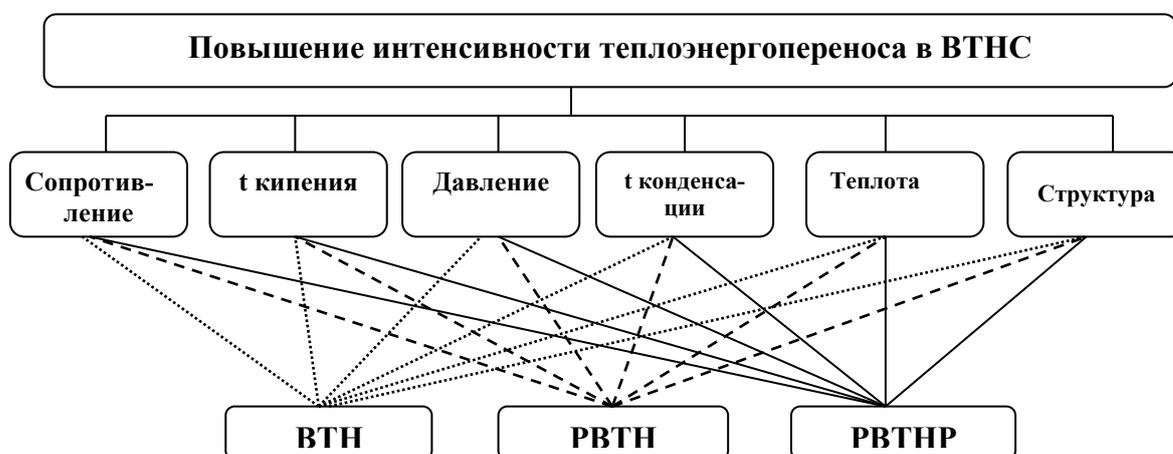


Рис. 3 Структура иерархии повышения энергоэффективности ВТНС для контура «фреоновый компрессионный цикл»

В вершине иерархии, используемой в МАИ для представления задачи принятия решений, располагается основная цель, далее, на уровень ниже – подцели, и, наконец, на самом нижнем уровне – альтернативы, среди которых производится выбор (и) или ранжирование.

Следующим этапом анализа будет являться определение приоритетов, представляющих относительную важность или предпочтительность элементов построенной иерархической структуры, с помощью процедуры парных сравнений отдельных компонент иерархии.

Данная таблица всегда строится на основе работы группы экспертов.

На основании имеющихся у экспертов знаний и накопленного опыта они отвечают на вопросы. Каждому суждению дается соответствующая экспертная оценка. Расчет среднего балла на основе средней арифметической позволяет получить результаты, отражающие согласованность экспертных суждений.

Используя 9-тибалльную шкалу сравнений, разработанную Т. Саати [3], составляются матрицы парных сравнений трех критериев относительно цели (табл. 1, 2, 3).

Таблица 1

Матрица парных сравнений относительно цели повышения интенсивности теплоэнергопереноса в ВТНС для контура «воздух-испаритель»

Цель	температура	объем	влажность
температура	1	6	4
объем	1/6	1	1/3
влажность	1/4	3	1

Таблица 2

Матрица парных сравнений относительно цели повышения интенсивности теплоэнергопереноса в ВТНС для контура «конденсатор-отапливаемое помещение»

Цель	t кипения	объем	плотность	химический состав
T кипения	1	4	6	7
объем	1/4	1	3	4
плотность	1/6	1/3	1	2
химический состав	1/7	1/4	1/2	1

Таблица 3

Матрица парных сравнений относительно цели повышения интенсивности теплоэнергопереноса в ВТНС для контура «фреоновый компрессионный цикл»

Цель	теплота	давление	сопротивление	t кипения	t конденса- ции	структура
теплота*	1	1/3	8	3	3	7
давление	3	1	9	3	3	9
сопротивление	1/8	1/9	1	1/6	1/5	2
t кипения	1/3	1/3	6	1	1/3	6
t конденсации	1/3	1/3	5	3	1	6
структура	1/7	1/9	1/2	1/6	1/6	1

* *теплота* – понимаем теплота парообразования

С точки зрения цели необходимо сформировать сравнительные суждения о важности критериев. Для этого следует выполнить попарные сравнения критери-

ев относительно цели, выработать общее суждение для каждой пары и записать их в матрицу. На примере контура окружающей среды – «воздух-испаритель» получаем квадратную матрицу 3×3 с одинаковым числом строк и столбцов (табл. 4).

Таблица 4

Оценка характеристик относительно цели для контура «воздух-испаритель»

Цели	t	V	B	Приоритеты			
				1 метод	2 метод	3 метод	4 метод
t	1	6	4	0,66	0,71	0,69	0,69
V	1/6	1	1/3	0,09	0,10	0,09	0,09
B	1/4	3	1	0,25	0,19	0,22	0,22
ИС	0,028						
ОС	0,04						

Грубые оценки этого вектора можно получить следующими четырьмя способами, которые представлены ниже в порядке увеличения точности оценок.

Первый метод. Суммировать элементы каждой строки и нормализовать делением каждой суммы на сумму всех элементов. Сумма полученных результатов будет равна единице. Первый элемент результирующего вектора будет приоритетом первого объекта, второй второго объекта и т.д.

Используя данные исходной матрицы (а), первый метод даёт сумму строк в виде вектора – столбца, который для экономии места запишем в виде строки (11,00; 1,503; 4,25).

Сумма всех элементов матрицы (а) получается путём сложения компонент этого вектора и равна 16,753. Разделив каждую компоненту вектора на это число, получим записанный в виде строки (0,66; 0,09; 0,25) вектор – столбец приоритетов различных моделей ВТНС относительно критерия « $f_{окр. среды}$ ».

Второй метод. Суммировать элементы каждого столбца и получить обратные величины этих сумм. Нормализовать их так, чтобы их сумма равнялась 1 разделить каждую обратную величину на сумму всех обратных величин.

Итак, сумма столбцов матрицы (а) в виде вектора - строки (1,42; 10,0; 5,33).

Обратными величинами этих сумм является (0,7; 0,1; 0,19), а после нормализации становятся (0,71; 0,1; 0,19).

Третий метод. Разделить элементы каждого столбца на сумму элементов этого столбца (т.е. нормализовать столбец), затем сложить элементы каждой полученной строки и разделить эту сумму на число элементов строки. Это - процесс усреднения по нормализованным столбцам.

Методом 3 нормализуем каждый столбец исходной матрицы (а) и получаем новую матрицу.

$$\underbrace{\begin{matrix} 1 & 6 & 4 \\ 0,17 & 1 & 0,33 \\ 0,25 & 3 & 1 \end{matrix}}_{\sum \quad 1,42 \quad 10 \quad 5,33} = \begin{bmatrix} 0,70 & 0,60 & 0,75 \\ 0,12 & 0,10 & 0,06 \\ 0,18 & 0,30 & 0,19 \end{bmatrix}$$

Сумма строк является вектором – столбцом (2,05;0,28;0,67), который после деления на размерность столбцов 3 позволяет получить вектор-столбец приоритетов (0,69;0,09;0,22).

Четвёртый метод. Умножить n элементов каждой строки и извлечь корень n -ой степени. Нормализовать полученные числа. Метод 4 даёт нам вектор приоритетов (0,76;0,19;0,05).

Сравнивая полученные результаты, следует отметить, что точность повышается от 1 к 2 методу и далее к 3, однако одновременно усложняются вычисления. Если матрица согласована, то во всех четырёх случаях векторы приоритетов будут практически одинаковыми. В случае несогласованности очень хорошее приближение можно получить только с помощью метода 4.

После расчёта вектора приоритетов необходимо провести вычисления индекса согласованности ($ИС$). Для чего нужно рассчитать λ_{\max} (называемое максимальным или главным собственным значением), используемое для оценки согласованности, отражающей пропорциональность предпочтений. Чем ближе λ_{\max}

к n (числу объектов в матрице), тем более согласован результат.

Отклонение от согласованности называется индексом согласованности ($ИС$) и выражается:

$$ИС = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Отношение $ИС$ к среднему случайному индексу ($СИ$) (которое имеет табличные значения для матриц определённого порядка) для матрицы того же порядка называется отношением согласованности ($ОС$):

$$ОС = \frac{ИС}{СИ} \leq 0,1 \quad (3)$$

Значение $ОС$, меньшее или равное 10%, считается приемлемым.

Итак, для вычисления согласованности используем исходную матрицу (a) и третий вектор-столбец, полученный методом 3.

После умножения матрицы справа на вектор приоритетов (0,69; 0,09; 0,22) имеем вектор-столбец (2,11; 0,28; 0,66). Разделив компоненты этого вектора на соответствующие компоненты первого вектора получим (3,06; 3,11; 3,00), а в результате усреднения последних – 3,06.

$$\begin{bmatrix} 1 & 6 & 4 \\ 0,17 & 1 & 0,33 \\ 0,25 & 3 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0,69 \\ 0,09 \\ 0,22 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2,11 \\ 0,28 \\ 0,66 \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} 0,69 \\ 0,09 \\ 0,22 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,06 \\ 3,11 \\ 3,00 \end{bmatrix} \approx 3,06$$

Отсюда, $ИС=(3,06-3):2=0,028$

Для определения того, насколько хорош этот результат, разделим его на соответствующий $СИ=0,58$ для матрицы 3×3 .

Отношение согласованности ($ОС$) $0,028:0,58 = 0,05$, что соответствует требованиям согласованности.

Оценка критериев относительно самих себя представлена в табл. 4, 5, 6.

Анализ результатов, приведенных в табл. 4, 5, 6 позволяет сделать вывод о значимости отдельных факторов, влияющих на общий показатель каждого контура в отдельности. Так, например, рассматривая критерий ««воздух-испаритель»», по оценкам экспертов наиболее значимый параметр – «температура воздуха» составляет 69% (3-ий метод), около 10% приходится на «объем воздуха» и 22% – на «влажность».

Таблица 5

Оценка характеристик относительно цели по критерию «теплоноситель»

Цель	t	V	ρ	Вяз	Приоритеты			
					1 метод	2 метод	3 метод	4 метод
t	1	4	6	7	0,57	0,65	0,62	0,62
V	1/4	1	3	4	0,26	0,18	0,22	0,22
ρ	1/6	1/3	1	2	0,11	0,10	0,10	0,10
Вяз	1/7	1/4	1/2	1	0,06	0,07	0,06	0,06
ИС	0,03							
ОС	0,03							

Таблица 6

Оценка характеристик относительно цели по критерию «рабочее тело»

Цель	Q	P	Сопр	t _к	t _{кон.}	Стр.	Приоритеты			
							1 метод	2 метод	3 метод	4 метод
Q	1	1/3	8	3	3	7	0,27	0,21	0,263	0,260
P	3	1	9	3	3	9	0,30	0,48	0,397	0,400
Сопр	1/8	1/9	1	1/6	1/5	2	0,04	0,04	0,033	0,034
t _к	1/3	1/3	6	1	1/3	6	0,17	0,10	0,116	0,116
t _{кон.}	1/3	1/3	5	3	1	6	0,19	0,14	0,164	0,163
Стр.	1/7	1/9	1/2	1/6	1/6	1	0,03	0,03	0,027	0,027
ИС	0,09									
ОС	0,07									

Для контура «конденсатор-отапливаемое помещение» наиболее значимым оказался параметр «рабочая температура» - более 60%, наименее «вязкость» - 6%. Для контура «фреоновый компрессионный цикл» эксперты отдали предпочтение параметру «давление» почти 40%, чуть больше 20% приходится на «теплоту», 11,6% и 16% на «температуру кипения и конденсации» соответственно,

около 3% на «сопротивление и структуру».

Следующий этап применения МАИ предполагает сравнение критериев третьего уровня относительно каждого критерия, влияющего на общее повышение интенсивности теплопереноса. На этом этапе проводим вычисление относительного ранга каждой модели ВТНС относительно каждого критерия по

каждому из трех контуров, что представлено в матрицах (а, б, в для характеристик контура «воздух-испаритель»; г, д, е, ж для характеристик контура «конденса-

тор-отапливаемое помещение»; з, и, к, л, м, н для характеристик контура «фреоновый компрессионный цикл»).

Таблица 7

Для контура «воздух-испаритель»

показатель	а) по критерию «Температура окружающей среды (токр. среды)»			б) по критерию «Объем воздуха ($V_{\text{возд.}}$)»			в) по критерию «Влажность»		
	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР
ВТН	1	9	7	1	1/4	1/8	1	1/3	1/5
РВТН	1/9	1	8	4	1	1/6	3	1	1/4
РВТНР	1/7	1/8	1	8	6	1	5	4	1

Таблица 8

Для контура «конденсатор-отапливаемое помещение»

показатель	г) по критерию «Температура»			д) по критерию «Объем»			е) по критерию Плотность (ρ)			ж) по критерию «Вязкость»		
	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР
ВТН	1	1	1	1	1/4	1/6	1	1/2	1/3	1	1/2	1/4
РВТН	1	1	1	4	1	1/3	2	1	1/3	2	1	1/3
РВТНР	1	1	1	6	3	1	3	3	1	4	3	1

Таблица 9

Для контура «фреоновый компрессионный цикл»

показатель	з) по критерию «Теплота (Q)»			и) по критерию «Давление (P)»			к) по критерию «Сопротивление (Сопр)»		
	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР
ВТН	1	1/4	1/6	1	1/5	1/7	1	1/2	1/3
РВТН	4	1	1/3	5	1	1/4	2	1	1/2
РВТНР	6	3	1	7	4	1	3	2	1

показатель	л) по критерию «Температура кипения (t_k)»			м) по критерию «Температура конденсации ($t_{\text{кон.}}$)»			н) по критерию «Структура (Стр)»		
	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР	ВТН	РВТН	РВТНР
ВТН	1	1/2	1/4	1	1	1	1	1/3	1/4
РВТН	2	1	1/3	1	1	1	3	1	1/3
РВТНР	4	3	1	1	1	1	4	3	1

Результаты вычислений представлены в табл.10, 11, 12.

Таблица 10

Сравнение моделей ВТНС относительно трех параметров контура «воздух-испаритель»

Критерии	Приоритеты моделей ВТНС (ВТН; РВТН; РВТНР)				ИС	ОС
	1 метод	2 метод	3 метод	4 метод		
$t_{\text{окр. среды}}$	0,62;0,33;0,05	0,83;0,103;0,065	0,71;0,23;0,06	0,76;0,19;0,05	0,352	0,61
$V_{\text{возд.}}$	0,064;0,24;0,7	0,08;0,14;0,78	0,07;0,19;0,74	0,07;0,18;0,75	0,07	0,12
Влажность	0,1;0,27;0,63	0,11;0,2;0,69	0,1;0,23;0,67	0,01;0,25;0,74	0,042	0,07

Таблица 11

Сравнение моделей ВТНС относительно четырех параметров контура «конденсатор-отапливаемое помещение»

Критерии	Приоритеты моделей ВТНС (ВТН; РВТН; РВТНР)				ИС	ОС
	1 метод	2 метод	3 метод	4 метод		
t	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,00	0,00
V	0,08;0,32;0,60	0,09;0,24;0,67	0,09;0,27;0,64	0,09;0,27;0,64	0,03	0,05
ρ	0,15;0,27;0,58	0,17;0,22;0,61	0,16;0,25;0,59	0,16;0,25;0,59	0,03	0,05
Вяз	0,13;0,25;0,61	0,14;0,22;0,63	0,14;0,24;0,62	0,14;0,24;0,62	0,01	0,02

Таблица 12

Сравнение моделей ВТН относительно шести характеристик по критерию «фреоновый компрессионный цикл»

Критерии	Приоритеты моделей ВТНС (ВТН; РВТН; РВТНР)				ИС	ОС
	1 метод	2 метод	3 метод	4 метод		
Q	0,08;0,32;0,60	0,09;0,24;0,67	0,09;0,27;0,64	0,09;0,27;0,64	0,03	0,05
P	0,07;0,32;0,61	0,08;0,19;0,73	0,07;0,25;0,68	0,07;0,24;0,69	0,06	0,11
Сопр	0,16;0,31;0,53	0,17;0,30;0,53	0,16;0,30;0,54	0,16;0,30;0,54	0,00	0,01
t_k	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,00	0,00
$t_{\text{кон.}}$	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,33;0,33;0,33	0,00	0,00
Стр.	0,11;0,31;0,57	0,13;0,23;0,64	0,12;0,27;0,61	0,12;0,27;0,61	0,04	0,06

На заключительном этапе применения МАИ определяем альтернативы с наибольшим приоритетом.

Чтобы получить общее ранжирование моделей ВТН (табл. 13, 14, 15),

необходимо умножить матрицу из табл. 10, полученную третьим методом, на транспортированный вектор-строку весов характеристик по критерию «окружающая среда» из табл. 4.

Таблица 13

Глобальные приоритеты повышения интенсификации теплообмена при выборе моделей ВТНС по контуру «воздух-испаритель»

Критерий	$t_{\text{окр. среды}}$	$V_{\text{возд.}}$	Влажность	Приоритеты
ВТН	0,71	0,07	0,10	0,5182
РВТН	0,23	0,19	0,23	0,2264
РВТНР	0,06	0,74	0,67	0,2554
Оценки (веса)	0,69	0,09	0,22	1,0000

Таблица 14

Глобальные приоритеты повышения интенсификации теплообмена при выборе моделей ВТНС по контуру «конденсатор-отапливаемое помещение»

Критерий	t	V	ρ	Вяз	Приоритеты
ВТН	0,33	0,09	0,16	0,14	0,2488
РВТН	0,33	0,27	0,25	0,24	0,3034
РВТНР	0,33	0,64	0,59	0,62	0,4416
Оценки (веса)	0,62	0,22	0,10	0,06	1,000

Таблица 15

Глобальные приоритеты повышения интенсификации теплообмена при выборе моделей ВТНС по контуру «фреоновый компрессионный цикл»

Критерий	Q	P	Сопр	t_k	$t_{\text{кон.}}$	Стр.	Приоритеты
ВТН	0,09	0,07	0,16	0,33	0,33	0,12	0,1524
РВТН	0,27	0,25	0,30	0,33	0,33	0,27	0,2799
РВТНР	0,64	0,68	0,54	0,33	0,33	0,61	0,5650
Оценки (веса)	0,263	0,397	0,033	0,116	0,164	0,027	1,000

Сводные результаты расчетов глобальных приоритетов повышения интенсификации теплообмена при выборе моделей ВТНС, рассчитанные всеми четырьмя методами, предложенными Т.

Саати, по трем контурам представлены в таблице 16. Рассмотренные способы расчета будут отличаться максимальной точностью результатов либо минимальной величиной погрешности.

Таблица 16

Глобальные приоритеты повышения интенсификации теплопереноса при выборе моделей ВТНС, рассчитанные четырьмя методами, в разрезе трех контуров

Модели ВТНС	Приоритеты по контурам											
	«воздух-испаритель»				«конденсатор-отапливаемое помещение»				«фреоновый компрессионный цикл»			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
ВТН	0,4400	0,6193	0,5182	0,5326	0,2332	0,2575	0,2488	0,2488	0,1711	0,1472	0,1524	0,1522
РВТН	0,3069	0,1253	0,2264	0,2023	0,3160	0,2951	0,3034	0,3034	0,3229	0,2397	0,2799	0,2758
РВТНР	0,2535	0,2554	0,2554	0,2648	0,4445	0,4402	0,4416	0,4416	0,5009	0,6107	0,5650	0,5693
Цель	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000

Таким образом, благодаря применению МАИ можно математически достаточно объективно установить каково влияние и роль той или иной модели ВТНС на повышение интенсификации теплопереноса.

Не смотря на то, что при оценке приоритетов параметров контура «воздух-испаритель» наибольший приоритет получился у классической модели ВТН (51,82%), параметров контура «конденсатор-отапливаемое помещение» и «фреоновый компрессионный цикл» преимущественное значение имеет модель РВТНР (44,16% и 56,5% соответственно).

Такие результаты вполне обоснованы, так как классический ВТН рассчитан на работу с естественными параметрами окружающей среды. В то время, как усовершенствованные модели РВТН и

РВТНР выигрывают по другим критериям в силу встроенных в их конструкцию дополнительных приспособлений, которые принудительно создают условия для повышения эффективности их работы.

Заключение

Метод анализа иерархий позволяет установить взаимосвязь между основными термодинамическими и теплофизическими параметрами различных критериев, которые оказывают существенное влияние на повышение интенсивности теплопереноса при выборе эффективной энергосберегающей модели ВТНС.

Решение проблемы выбора модели ВТНС для повышения энергоресурсосбережения при использовании идеальных единиц измерения (стоимостных) можно

из технической системы «режим работы – затраты» перевести в экономическую задачу как система «эффективность – стоимость». В этой связи необходимо пересмотреть иерархию проблемы, так как имеются общая цель и одинаковые альтернативы, параметры трех контуров представить как уровень «критерии». Это позволит нам установить новые взаимосвязи между критериями (контурами) и получить их приоритет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Климатические условия и факторы, влияющие на производительность воздушного теплового насоса // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений / В. А. Воронов [и др.]: сб. науч. тр. / ИВГПУ. - Иваново, 2015. - С. 241-251.
2. Энергоэффективность рабочего тела (хладоагента) воздушного теплового насоса в режиме обогрева автономного текстильного цеха (производства) // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений / В. Н. Федосеев [и др.]: сб. науч. тр. / ИВГПУ. - Иваново, 2016. С.186-194.
3. Алоян Р. М., Федосеев В. Н., Алоян С. М., Зайцева И. А., Виноградова Н. В. Возможный диапазон работы воздушного теплового насоса в отопительный период // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 4 (370). С. 278-281.
4. Алоян Р. М., Федосеев В. Н., Виноградова Н. В., Ткачев В. М., Емелин В. А. Термодинамическая эффективность воздушных тепловых насосов, используемых в малоэтажных текстильных строениях // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5 (371). С. 314-318.
5. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Виноградова Н.В. Количественный анализ конфигурации коэффициента эффективности и тепловой мощности воздушного теплового насоса при отоплении малоэтажных текстильных строений // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5 (371). С. 319-323.
6. Алоян Р. М., Федосеев В. Н., Зайцева И. А., Виноградова Н. В., Емелин В. А., Воронов В. А. Сравнительный анализ комбинированных режимов работы ВТН для малоэтажных строений в текстильной отрасли // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 5 (371). С. 324-328.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
8. Теория и практика решения задач: приоритеты в системе управления ЖКХ: учеб.-метод. пособие / Д. В. Макаров [и др.] - Иваново: ОАО «Издательство «Иваново», 2013. - 83с.
9. Теплоноситель для системы отопления - вода или антифриз [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rmnt.ru/story/heating/teplonositel-dlja-sistemy-otoplenija-voda-ili-antifriz.423043/#go-kak-vybrat-optimalnyj-teplonositel> (дата обращения: 04.06.2020).
10. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 1 октября 1996 г. № 21).
11. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях.
12. Свод правил СП 60.13330.2012, СНиП 41-01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 30 июня 2012 г. № 279) (с изменениями и дополнениями).

MULTI-CRITERIA MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER IN AIR HEAT PUMP SYSTEMS FOR THE PURPOSE OF ENERGY-SAVING SOLUTIONS USING THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD

S.V. Fedosov¹, V. N. Fedoseev², I. A. Zaytseva²

¹National research Moscow state University of civil engineering, Moscow, Russia

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ivanovo state Polytechnic University», Ivanovo, Russia

The article substantiates the feasibility of using the method of analysis of hierarchies. In the process of modeling heat and mass transfer in the evaporative-condenser unit of the air heat pump (VTN), it is necessary to determine its main parameters and prioritize. The study of the factors influencing the heat and power efficiency of the heat pump system of VTN, such as environmental parameters, humidity, air volume, thermal and physical properties of the

coolant, working fluid and others, will achieve the set goal: improvement (modernization) of the evaporative-condenser unit of VTN. In this study, the method of analysis of hierarchies is implemented through the use of the method of expert assessments, which improves the quality of the results and conclusions.

Keywords: heat pump, heat pump system of heat supply, evaporative condenser unit, coolant, the method of hierarchies, expert evaluation

References

1. Voronov V. A., Emelin V. A., Fedoseev V. N., Zaytseva I. A. Climatic conditions and factors affecting the performance of the air heat pump // Theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions. Collection of proceedings. - 2015. P. 241-251.
2. Fedoseev V. N., Petrukhin A. B., Emelin V. A., Voronov V. A., Zaytseva I. A. energy Efficiency of the working fluid (freon) of the air heat pump in the heating mode of the Autonomous textile workshop (production) // theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions. Collection of proceedings. Ivanovo, 2016. p. 186-194.
3. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Aloyan S. M., Zaytseva I. A., Vinogradova N. V. Possible range of operation of the air heat pump in the heating period // proceedings of higher educational institutions. Technology of textile industry. - 2017. № 4 (370). С. 278-281.
4. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Vinogradova N. V., Tkachev V. M., Emelin V. A. Ter-modinamic efficiency of air heat pumps used in low-rise textile structures // proceedings of higher educational institutions. Technology of the textile industry. 2017. № 5 (371). P. 314-318.
5. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Zaytseva I. A., Vinogradova N. V. Quantitative analysis of the configuration of the efficiency coefficient and thermal power of the air heat pump in heating low-rise textile structures. Izvestiya vyshe educational institutions. Technology of textile industry. 2017. № 5 (371). P. 319-323.
6. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Zaytseva I. A., Vinogradova N. V., Emelin V. A., Voronov V. A. Comparative analysis of combined modes of operation of VTN for low-rise buildings in the textile industry // proceedings of higher educational institutions. Technology of textile industry. 2017. № 5 (371). P. 324-328.
7. Saati T. decision-Making. The method of hierarchy analysis: per. from English. – Moscow: Radio and communication, 1993. – 278s.
8. Theory and practice of problem solving: Priorities in the housing and communal services management system: Teaching aid / Makarov D. V., Zaytseva I. A., Andreeva O. R., Tatievsky P. B. - Ivanovo: JSC "Publishing house "Ivanovo", 2013 - 83с.
9. Coolant for heating system - water or antifreeze Sanitary rules and regulations San PiN 2.2.4.548-96 "Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises" (app. by the resolution of Goskomsanepidnadzor of the Russian Federation from October 1, 1996 21.
10. GOST 30494-2011. Residential and public buildings. The parameters of the microclimate in the premises.
11. Set of rules SP 60.13330.2012, SNiP 41-01-2003. Heating, ventilation and air conditioning. The updated edition of SNiP 41-01-2003 (app. the order of the Ministry of regional development of the Russian Federation of June 30, 2012 № 279) (as amended).