



УДК: 621.577.6:001.891.57:510.532

# ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ ЭКСПЕРТНЫХ СУЖДЕНИЙ КРИТЕРИЕВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

**С.В. Федосов<sup>1</sup>, В.Н. Федосеев<sup>2</sup>, И.А. Зайцева<sup>3</sup>, В.А. Воронов<sup>2</sup>**

*Сергей Викторович Федосов*

<sup>1</sup>Кафедра технологии вяжущих веществ и бетонов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Ярославское шоссе, 26, Москва, Российская Федерация, 129337  
E-mail: fedosov-academic53@mail.ru

*Вадим Николаевич Федосеев*

<sup>2</sup>Кафедра организации производства и городского хозяйства, Ивановский государственный политехнический университет, пр. Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: 4932421318@mail.ru

*Ирина Александровна Зайцева*

<sup>3</sup>Кафедра экономики, управления и финансов, Ивановский государственный политехнический университет, пр. Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: 75zss@rambler.ru

*Владимир Андреевич Воронов*

<sup>2</sup>Кафедра организации производства и городского хозяйства, Ивановский государственный политехнический университет, пр. Шереметевский, 21, Иваново, Российская Федерация, 153000  
E-mail: atenamiiii@gmail.com



*В статье обосновывается целесообразность использования методики анализа иерархий, в качестве эффективного инструмента математического прогнозирования системного и необходимого подхода для анализа сложных проблем при поддержке принятия управленческих решений. В этом исследовании основу методологии анализа иерархий составил метод экспертных оценок, в котором проводили экспертизу профессионалы различного рода деятельности. Главная цель этого метода - определение наиболее сложных факторов рассматриваемой проблемы, улучшение показателя качества получаемых данных и выводов. При проведении исследования была сформирована группа независимых экспертов, посредством индивидуального опроса определены параметры повышения энергоэффективности воздушного теплового насоса. Экспертное обоснование теплофизических свойств теплоносителя, рабочего тела, окружающей среды позволило провести объективное математически обоснованное сравнение и расчет приоритетов вариантов анализируемых моделей воздушного теплового насоса.*

**Ключевые слова:** метод анализа иерархий, энергоэффективность, воздушный тепловой насос

**Для цитирования:**

Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А. Обоснование методом анализа иерархий экспертных суждений критериев повышения энергоэффективности воздушного теплового насоса. Умные композиты в строительстве. 2021. Т. 2. №. 2. С. 38-47 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V2N2\\_2021](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V2N2_2021)

**DOI:** 10.52957/27821919\_2021\_2\_38



UDC: 001.891.57:510.532

# *THE HIERARCHY ANALYSIS METHOD IN BACKING EXPERT JUDGMENTS OF CRITERIA FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF AIR HEAT PUMP*

*S.V. Fedosov<sup>1</sup>, V.N. Fedoseev<sup>2</sup>, I.A. Zaytseva<sup>3</sup>, V.A. Voronov<sup>2</sup>*

*Sergey V. Fedosov*

*<sup>1</sup>Department of Technology of Binders and Concretes, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl Highway, 26, Moscow, 129337, Russia*

*E-mail: fedosov-academic53@mail.ru*

*Vadim N. Fedoseev*

*<sup>2</sup>Department of Production Management and Municipal Economy, Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevsky ave., 21, Ivanovo, 153000, Russia*

*E-mail: 4932421318@mail.ru*

*Irina A. Zaytseva*

*<sup>3</sup>Department of Economics, Management and Finance, Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevsky ave., 21, Ivanovo, 153000, Russia*

*E-mail: 75zss@rambler.ru*

*Vladimir A. Voronov*

*<sup>2</sup>Department of Production Management and Municipal Economy, Ivanovo State Polytechnic University, Sheremetevsky ave., 21, Ivanovo, 153000, Russia*

*E-mail: amenamiiii@gmail.com*



*The article substantiates the expediency of using the hierarchy analysis method as a mathematical tool for forecasting a systemic and necessary approach for analyzing complex problems using managerial decision-making. In this study, the hierarchy analysis method is implemented based on the expert assessment method, in which the respondents are experts – specialists in a particular area of expertise. The main purpose of the expert assessment method is to identify complex aspects of the problem under study, to improve the quality of information and conclusions. During the study, a group of independent experts was formed, through an individual survey, criteria for improving the energy efficiency of an air heat pump were determined. The expert substantiation of the thermophysical properties of the coolant, the working fluid, the environment made it possible to conduct an objective mathematically substantiated comparison and calculation of the priorities of the variants of the analyzed models of the air heat pump.*

**Key words:** *hierarchy analysis method, energy efficiency, air source heat pump*

**For citation:**

*Fedosov S.V., Fedoseev V.N, Zaytseva I.A., Voronov V.A. The hierarchy analysis method in backing expert judgments of criteria for increasing the energy efficiency of air heat pump. Smart Composite in Construction. 2021. Vol. 2. No 2. P. 38-47 URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V2N2\\_2021](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V2N2_2021)*

**DOI:** 10.52957/27821919\_2021\_2\_38



## ВВЕДЕНИЕ

Повышение степени качества процедуры принятия решений можно достичь групповой экспертизой, где эксперты обладают своим уникальным мнением по разрешению либо оценке поставленной задачи.

Оценки экспертов, как правило, принимаются в опросной форме. В количественном виде мнение экспертов определяется методом анализа иерархий (МАИ), основные положения и принципы данного метода представлены на рис. 1.

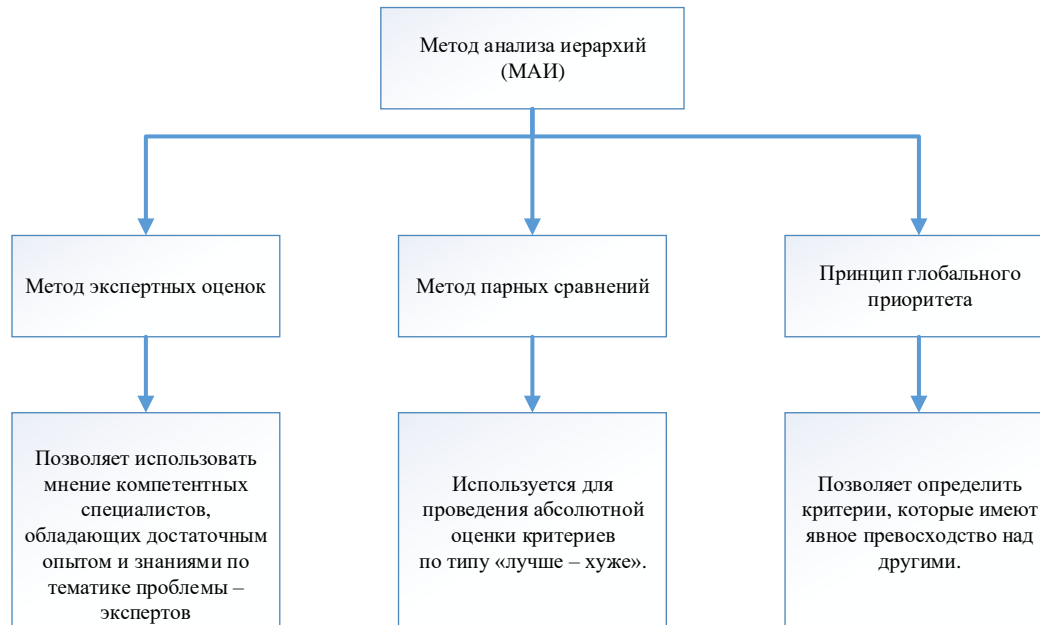


Рис. 1. Основные положения методологии МАИ  
Fig. 1. Main provisions of the MAI methodology

Рис. 1 наглядно демонстрирует, что в основе МАИ лежат элементы, в совокупности позволяющие оперативно выбирать рациональное решение проблемы. При этом решение будет наилучшим образом согласовываться с индивидуальным пониманием основной проблематики конкретно каждого эксперта.

Среди основных элементов МАИ стоит выделить метод экспертных оценок, который подразумевает, что в качестве экспертов будут выбраны профессионалы различного рода деятельности. Главная цель этого метода в определении наиболее сложных факторов рассматриваемой проблемы, улучшение показателя качества получаемых данных и выводов. Уникальность метода заключается в профессиональности экспертизы, которая обеспечивает качественный анализ и решение поставленных проблем. Мнения экспертов предполагают процесс сравнения элементов объекта исследования по заданным параметрам и называются экспертными оценками [3].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель исследования сводилась к решению двух задач:

1) Создать группу независимых экспертов, которые, как минимум, обладают ученой степенью кандидата наук, многолетним опытом производства и анализа. Количество экспертов определяется исходя из трудоемкости выбранной исследовательской работы. В рамках данного исследования для опроса были выбраны 6 экспертов.

2) Определение параметров для сравнения вариантов рассматриваемых теплонасосных устройств.

Подробность экспертного мнения определяет степень качества, а, следовательно, и результативность решения проблемы. Таким образом, экспертиза специалистами становится этапом значительной важности. Чтобы эксперты могли определить важность параметров, относительно цели исследования, необходимо детальнее рассмотреть основные элементы, разбив их на составляющие (рис. 2).

На рис. 2 изображены основные параметры и теплофизические свойства объекта исследования, которые определялись в соответствии с изложенными ранее выводами экспертов [2].

Допустимые параметры воздуха в рамках данного исследования определялись существующей базой нормативных документов. Этими параметрами создается и поддерживается комфортный микроклимат в помещении. Параметр скорости авторы заменили на показатель объема, поскольку он наиболее корректно показывает значение приточного наружного воздуха.

Эксперты рассматривали систему отопления, где функцию теплоносителя выполняла вода, поскольку она обладает высокой теплоемкостью, ее стоимость значительно ниже теплоносителей-конкурентов.

Параметры рабочего тела подобраны на основании проведенных исследований [4–6]. От свойств рабочего тела зависит величина потери тепла в процессе теплообмена, а следовательно, на энергоэффективность теплогенерации.



Выбранные параметры рабочего тела, окружающей среды и теплоносителя обладают наибольшим влиянием на эффективность теплообмена.

Уменьшение человеческого фактора является немаловажной задачей, которая в методологии Т. Саати решается при

помощи такого понятия как мера согласованности матрицы. [1]

На следующем шаге посредством парного сравнения различных элементов иерархии выбираются наиболее важные для преследуемой цели исследования. Результаты оцениваются по 9-балльной шкале.

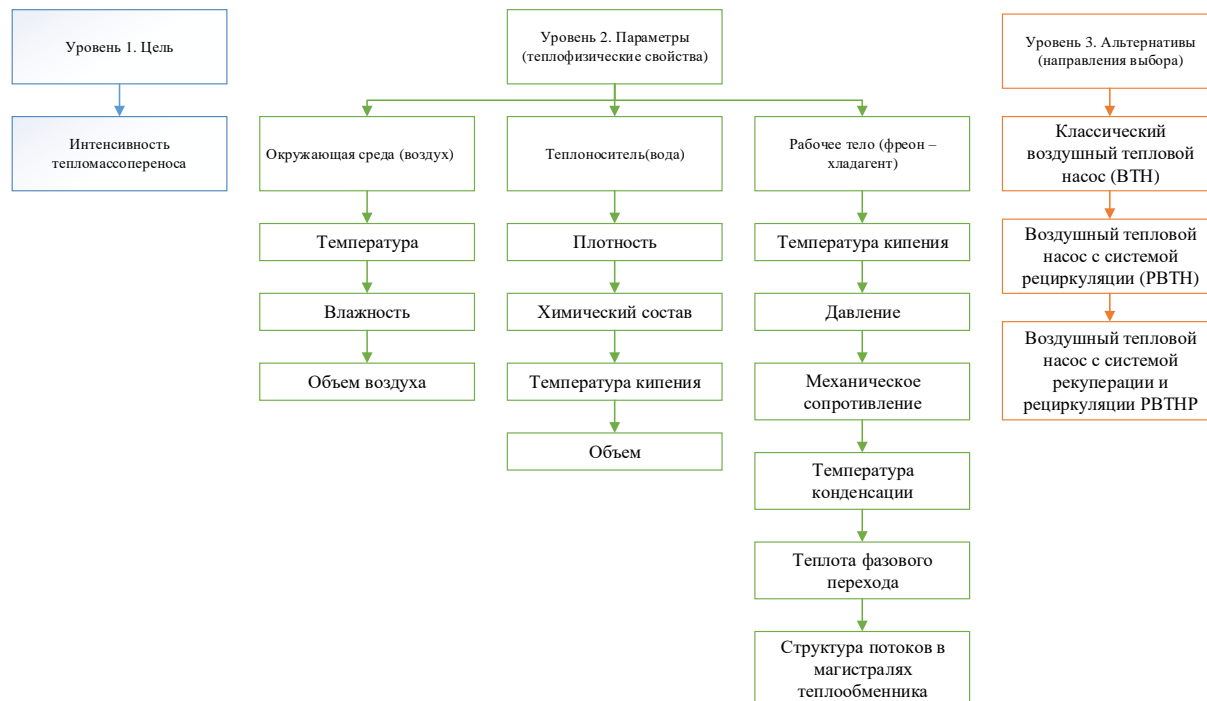


Рис. 2. Иерархия проблематики выбора приоритетных направлений повышения эффективности переноса тепловой энергии

Fig. 2. Hierarchy of the problems of choosing priority directions for improving the efficiency of heat transfer

Ответ эксперта представлен числом от 1 до 9. Опрос членов экспертной команды проводился индивидуально и независимо друг от друга, далее определялось среднее значение полученных оценок и заносилось в таблицы парных сравнений. Средний балл определялся среднеарифметической простой.

Такой подход позволяет оценить согласованность экспертных суждений.

Таблица 1. Оценка экспертов основных параметров и теплофизических свойств объекта исследования

Table 1. Expert assessment of the main parameters and thermophysical properties of the object of study

Вопросы для опроса и анализа	1-й эксперт	2-й эксперт	3-й эксперт	4-й эксперт	5-й эксперт	6-й эксперт	Средний балл
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>По параметрам окружающей среды</b>							
Параметр «температура» важнее параметра «влажность» для достижения цели?	5	5	6	3	2	3	4
Параметр «температура» важнее параметра «объем воздуха»?	5	5	7	6	6	7	6
Параметр «влажность» важнее параметра «объем воздуха»?	3	3	2	4	3	3	3



<b>По параметрам теплоносителя</b>							
Параметр «температура кипения» важнее параметра «объем»?	4	4	4	5	3	4	4
Параметр «температура кипения» важнее параметра «плотность»?	5	7	6	6	4	8	6
Параметр «температура кипения» важнее параметра «вязкость»?	7	6	8	7	7	7	7
Параметр «объем» важнее параметра «плотность»?	2	4	3	3	2	4	3
Параметр «объем» важнее параметра «вязкость»?	4	5	6	3	3	4	4
Параметр «плотность» важнее параметра «вязкость»?	1	1	3	3	2	2	2
<b>По параметрам рабочего тела</b>							
Параметр «давление» важнее параметра «теплота»?	3	3	3	3	3	3	3
Параметр «теплота» важнее параметра «сопротивления»?	8	9	7	6	9	9	8
Параметр «теплота» важнее параметра «температура кипения»?	2	4	3	3	2	4	3
Параметр «теплота» важнее параметра «температура конденсации»?	3	4	3	4	2	2	3
Параметр «теплота» важнее параметра «структура»?	7	7	7	7	7	7	7
Параметр «давление» параметра «сопротивление»?	9	9	9	9	9	9	9
Параметр «давление» важнее параметра «структура»?	9	9	9	9	9	9	9
Параметр «давление» важнее параметра «температура кипения»?	2	4	4	2	2	4	3
Параметр «давление» важнее параметра «температура конденсации»?	4	3	2	2	3	4	3
Параметр «сопротивление» важнее параметра «структура»?	2	2	2	2	2	2	2
Параметр «температура кипения» важнее параметра «сопротивление»?	5	7	6	6	4	8	6
Параметр «температура кипения» важнее параметра «структура»?	7	6	5	6	6	6	6
Параметр «температура конденсации» важнее параметра «сопротивление»?	5	4	6	5	5	4	5
Параметр «температура конденсации» важнее параметра «структура»?	6	6	6	6	6	6	6
Параметр «температура конденсации» важнее параметра «температура кипения»?	3	2	5	2	3	3	3

Основной целью исследования являлось повышение интенсивности теплообмена. При этом побудительным фактором является организация системы комфортного отопления в жилых и административных зданиях.

Для параметров окружающей среды в рамках обозначенной цели матрица парных значений приобретет вид 3x3, при этом в левом столбце и в верхней строке матрицы приведены параметры (табл. 2).

Значение параметра «объем» меньше, если сравнивать со значением параметра «температура», ввиду того, что температура окружающей среды, в большей степени, влияет на интенсивность генерации тепла тепловым насосом - ставим оценку 6.

Параметр «влажность» несколько менее важен, чем «температура», поскольку эти параметры взаимосвязаны. При снижении влажности увеличивается температура, а значит, увеличивается эффективность переноса тепла - ставим оценку 4.



**Таблица 2. Оценки экспертов сравнения параметров окружающей среды**

**Table 2. Expert assessments and comparisons of environmental parameters**

Цель	Температура	Объем	Влажность
Температура	1	6	4
Объем	1/6	1	1/3
Влажность	1/4	3	1

Значимость параметра «влажность» гораздо ниже параметра «объем». При выборе между этими параметрами по значимости для теплообмена теплового насоса предпочтению, с большей долей вероятности, будет отдано «влажности» - ставим оценку 3.

В строках, где сходится сравнение параметра с самим собой, ставим оценку 1, таким образом, диагональ таблицы составляют единицы.

На пересечении столбца «температура» и строки «объем» заносим соответствующие обратные значения сравнения: 1/6. Таким же образом поступаем с другими элементами. Оценка этих суждений составит определенную позицию матрицы.

Следуя описанной выше последовательности, присваиваются оценки параметрам теплоносителя и рабочего тела с учетом основной цели исследования.

Оценки экспертов сравнения параметров теплоносителя приведены в табл. 3.

**Таблица 3. Оценки экспертов сравнения параметров теплоносителя**

**Table 3. Expert assessments comparing the parameters of the coolant**

Цель	$T_{\text{кипения}}$	Объем	Плотность	Химический состав
$T_{\text{кип}}$	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

Параметр «объем» в 4 раза менее важен, чем параметр « $T_{\text{кип}}$ », поскольку значение объема теплоносителя - это следствие изменения температуры кипения.

Поскольку показатель плотности меняется при изменении температуры, в сравнении параметров « $T_{\text{кип}}$ » и «плотность» первый будет явно преобладать - ставим оценку 6.

С учетом того, что в отопительных системах используется дистиллированная вода, в которой полностью отсутствует примеси, значение параметра «химический состав» будет значительно меньше параметра « $T_{\text{кип}}$ ». Ставим оценку 7 в пользу последнего.

Значение параметра «объем» чуть более важен, чем «плотность» - ставим оценку 3.

Относительно «химического состава» параметр «объем» будет иметь небольшое преимущество - ставим оценку 4.

Значимость параметров «плотность» и «химический состав» фактически идентична - выставляем оценку 2.

Оценка экспертов сравнения параметров рабочего тела (табл. 4).

**Таблица 4. Оценка экспертов сравнения параметров рабочего тела**

**Table 4. Expert evaluation of comparison of working fluid parameters**

Цель	Теплота	Давление	Сопротивление	$T_{\text{кип}}$	$T_{\text{конд}}$	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
$T_{\text{кип}}$	1/3	1/3	6	1	1/3	6
$T_{\text{конд}}$	1/3	1/3	5	3	1	6
Структура	1/7	1/9	1/2	1/6	1/6	1

Параметр «давление» не важнее параметра «теплота», поскольку процесс передачи тепла сопровождается изменением давления - ставим оценку 3.

Значимость параметра «теплота» значительно выше, чем «сопротивление», поскольку тепловой поток зависит от скорости и направления движения рабочего тела по трубопроводам внутреннего контура теплового насоса - ставим оценку 8.

Параметры « $T_{\text{кип}}$ » и « $T_{\text{конд}}$ » являются менее существенными по сравнению с параметром «теплота» - оценка 3. Аналогично между параметрами « $T_{\text{кип}}$ » и « $T_{\text{конд}}$ » можно выявить лишь незначительную разницу - оценка 3. Параметр «давление» несущественно преобладает над параметрами « $T_{\text{кип}}$ » и « $T_{\text{конд}}$ » - оценка 3. Наглядно демонстрируемая связь между данными параметрами представляет основополагающий принцип работы воздушно-теплового насоса (ВТН). В компрессоре происходит процесс сжатия газообразного фреона до состояния, при котором возможен его переход в жидкость, при этом фреон нагревается. Далее фреон поступает в конденсатор, где отдает часть своего тепла внешнему контуру устройства, а сам при этом охлаждается до температуры окружающей среды. Охлажденный фреон в состоянии жидкости поступает в расширительную камеру, в которой проходит через дроссель. При этом фреон расширяется и охлаждается значительно ниже температуры окружающей среды, а его давление падает. В испарителе фреон в состоянии смеси газа и жидкости поглощает тепло в зоне охлаждения. Отбираемое тепло позволяет продолжить процесс испарения оставшейся жидкой части фреона и поддерживает стабильную низкую температуру испарителя, что создает условия для эффективного отбора тепла. Далее фреон вновь поступает в компрессор, и весь описанный цикл повторяется.





Таким образом, параметр «теплота» имеет преобладающее положение по сравнению с параметром «структура» - ставим оценку 7. Структурой определяются технологические характеристики трубопроводов внутреннего контура ВТН, а именно толщина стенки и материал изготовления. На передачу тепловой энергии будут влиять такие факторы как характер движения теплоносителя, его скорость и полезная площадь поверхности теплообмена.

Параметр «давление» значительно важнее параметров «сопротивление» и «структура», поскольку рабочее тело внутреннего контура всегда находится под давлением - ставим оценку 9. Причем как сжатие, так и разрежение рабочего тела осуществляет единственный компрессор внутреннего контура. Параллельно компрессору зоны высокого и низкого давления разделяет дроссель, ограничивая поток фреона.

Параметр «сопротивление» в сравнении с параметром «структура» имеет невысокую значимость - ставим оценку 2. Структура отвечает за гидравлический режим работы внутреннего контура ВТН (длина, диаметр трубопровода, расход рабочего тела, потеря давления).

Параметр « $T_{кит}$ » обладает значением промежуточной значимости по отношению к таким параметрам, как «структура» и «сопротивление» - оценка 6. Таким же образом суждения сходятся касательно параметров « $T_{конд}$ » и «структура» - ставим оценку 6. Незначительно ниже сложилась оценка параметра « $T_{конд}$ » относительно «сопротивление» - оценка 5. На теплоотдачу в этом случае, прежде всего, влияют физические свойства.

Результаты исследования позволяют перейти к следующему этапу МАИ, в рамках которого будет выполнено вычисление относительного ранга рассматриваемых теплонасосных устройств в отношении всех параметров из трех рассматриваемых контуров, а также нахождение и подбор альтернативы с наивысшим приоритетом.

## ВЫВОДЫ

МАИ преобладает над аналоговыми методами потому, что мнение экспертов выражается в цифровом виде, не допуская неточности в результате оценки, при этом четко формулируется цель исследования, ее основные элементы, параметры и их взаимосвязь. В процессе выбора рассматриваемых параметров основных элементов необходимо определить их значимость относительно основной цели, поскольку от этого будет зависеть постановка вопросов в опросных анкетах для экспертов.

Итоговый результат исследования, в большой степени зависит, от оценки суждений, которую необходимо проводить максимально корректно. Опрос целой группы экспертов дает возможность найти компромиссные решения и достичь высокой степени согласованности конечного результата.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. Пер. с англ. М.: Радио и связь. 1993. 278 с.
2. **Федосеев В.Н., Зайцева И.А.** Информационно-аналитический подход к решению сложных слабоструктурированных задач методом анализа иерархий МАИ. Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений: Сборник научных трудов. Иваново: Иванов. гос. политехн. ун-т. 2019. С. 72-82.
3. **Федосеев В.Н., Зайцева И.А.** Экспертиза объектно-пространственного моделирования ВТН методом анализа иерархий. Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений: Сборник научных трудов. Иваново: Иванов. гос. политехн. ун-т. 2019. С. 136-152.
4. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А.** Многокритериальный процесс моделирования тепломассопереноса в воздушных теплонасосных системах с целью энергоресурсосберегающих решений методом анализа иерархий. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2020. № 3(63). С. 98-111.
5. **Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Петрухин А.Б., Зайцева И.А., Виноградова Н.В., Острякова Ю.Е.** Эффективность отопления тепловым насосом автономных текстильных производств в зависимости от уровня термодинамической активности. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. № 1(367). С. 179-184.
6. **Макаров Д.В., Зайцева И.А., Андреева О.Р., Татиевский П.Б.** Теория и практика решения задач: Приоритеты в системе управления ЖКХ: Учеб.-метод. пособие. Иваново: ОАО «Издательство «Иваново». 2013. 83 с.

Поступила в редакцию 16.06.2021

Принята к опубликованию 21.06.2021

## REFERENCES

1. **Saatii T.** Decision-Making. Method of hierarchy analysis. Trans. from English. Moscow: Radio and communications. 1993. 278 p. (in Russian).
2. **Fedoseev V.N., Zaytseva I.A.** Information and analytical approach to solving complex weakly structured problems by the method of hierarchy analysis (MAI). Theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions. Collection of proceedings. Ivanov. State Polytechnic. Un-t. Ivanovo. 2019. P. 72-82 (in Russian).
3. **Fedoseev V.N., Zaytseva I.A.** Expertise of object-spatial modeling of VTN by hierarchy analysis. Theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions. Collection of proceedings. Ivanov. State Polytechnic. Un-t. Ivanovo. 2019. P. 136-152 (in Russian).
4. **Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Zaytseva I.A.** Multi-criteria process of modeling heat and mass transfer in air heat pump systems for the purpose of energy-saving solutions by hierarchy analysis. Sovremennye Naukoemkie Tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie. 2020. N 3(63). P. 98-111 (in Russian).



5. **Aloyan R. M., Fedoseev V.N., Petrukhin A.B., Zaytseva I.A., Vinogradova N.V., Ostryakova Yu. E.** Efficiency of heat pump heating of Autonomous textile industries depending on the level of thermodynamic activity. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstilnoj promyshlennosti*. 2017. N 1(367). P. 179-184 (in Russian).
6. **Makarov D.V., Zaytseva I.A., Andreeva O.R., Tatievsky P.B.** Theory and practice of solving problems: Priorities in the management system of housing and communal services. Ivanovo: JSC «Publishing house «Ivanovo». 2013. 83 p. (in Russian).

Received 16.06.2021

Accepted 21.06.2021