

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
КОМБИНИРОВАННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВТН
ДЛЯ МАЛОЭТАЖНЫХ СТРОЕНИЙ В ТЕКСТИЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

**COMPARATIVE ANALYSIS
OF COMBINED MODES AIR-HEAT PUMP
FOR LOW-RISE BUILDINGS IN THE TEXTILE INDUSTRY**

Р.М. АЛОЯН, В.Н. ФЕДОСЕЕВ, И.А. ЗАЙЦЕВА, Н.В. ВИНОГРАДОВА, В.А. ЕМЕЛИН, В.А. ВОРОНОВ
R.M. ALOYAN, V.N. FEDOSEEV, I.A. ZAYTSEVA, N.V. VINOGRADOVA, V.A. EMELIN, V.A. VORONOV

(Ивановский государственный политехнический университет)
(Ivanovo State Polytechnical University)
E-mail: 4932421318@mail.ru

В статье проведен анализ эффективного применения различных моделей воздушно-тепловых насосов в условиях низких температур наружного воздуха в течение отопительного периода. Выявлено, что при низких температурах (-20°C и ниже) рассматриваемые модели классического воздушного теплового насоса, рециркуляционного воздушного теплового насоса (РВТН) и рециркуляционного воздушного теплового насоса с рекуперацией (РВТНР) необходимо применять в комбинированном режиме подключения. В систему теплоснабжения на короткий срок включается дополнительный генератор тепла, обеспечивающий достаточной мощностью ВТН для создания оптимальной отопительной нагрузки, увеличения COP и сокращения времени работы теплового насоса.

The article analyzes the effective application of different models of air-heat pumps at low ambient temperatures during the heating period. It is revealed that at low temperatures (-20°C and below) are considered model of the classic air heat pump, recirculating air heat pump and the recirculating air heat pump with heat recovery it is necessary to apply a combined heating regime. The heat supply system for a short period of time includes an additional heat generator that provides sufficient power to create an optimal heating load, increase the COP and reduce the operating time of the heat pump.

Ключевые слова: рециркуляционный воздушный тепловой насос, рециркуляционный воздушный тепловой насос с рекуперацией, комбинированный режим подключения, коэффициент преобразования, дополнительный источник тепла.

Keywords: recirculating air heat pump, recirculating air heat pump with heat recovery, combined mode of connection, the conversion factor, additional heat source.

Применение тепловых насосов в любой отрасли, в том числе и текстильной, является принципиально новым решением проблемы теплоснабжения малоэтажных зданий и позволяет в зависимости от климатических условий и режима работы достигать максимальной эффективности, так

как ВТН могут быть встроены в существующие системы отопления, горячего водоснабжения, системы кондиционирования [1...5].

В статье проведен анализ эффективного применения различных моделей воздушно-тепловых насосов (ВТН) в клима-

тических условиях большей части РФ в диапазоне температур от +10 до – 30°C. Так как продолжительность стояния умеренно холодных, низких и наиболее низких температур наружного воздуха в течение отопительного периода невелика, то экономически нецелесообразно поднимать (генерировать) дорогостоящую тепловую мощность воздушного теплового насоса на покрытие всей расчетной тепловой нагрузки. Поэтому необходимо рассматривать работу ВТН в экстремальных условиях с подключением дополнительного "пикового" аккумулятора, подключаемого только в период стояния низких и сверхнизких температур. Именно в таких случаях целесо-

образно применять такие модели ВТН, как рециркуляционный воздушный тепловой насос (РВТН); рециркуляционный воздушный тепловой насос с рекуперацией (РВТНР); геотермальный воздушный тепловой насос (ГВТН). Это модели воздушного теплового насоса, использующие приемлемую конфигурацию воздухообмена (рециркуляцию, рекуперацию), коэффициент преобразования (эффективности) которых принимает значение, близкое к 4 (как у ГВТН), при температурном диапазоне от -30 до +10°C, с теплотерями здания до 10,4 кВт·ч (табл. 1 – коэффициент преобразования (COP) для различных моделей ВТН) [1].

Таблица 1

| t _{наруж. возд.} , °С | t _{внутр. возд.} , °С | N _{компрессор} , кВт | COP ВТН | COP РВТН | COP РВТНР |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------|----------|-----------|
| -30 | 22 | 3 | 1,00 | 2,54 | 3,11 |
| -25 | 22 | 3 | 1,00 | 2,97 | 3,29 |
| -20 | 22 | 3 | 1,00 | 3,26 | 3,46 |
| -15 | 22 | 3 | 1,00 | 3,48 | 3,60 |
| -10 | 22 | 3 | 1,73 | 3,67 | 3,73 |
| -5 | 22 | 3 | 2,30 | 3,80 | 3,82 |
| 0 | 22 | 3 | 2,88 | 3,90 | 3,89 |
| +5 | 22 | 3 | 3,45 | 3,96 | 3,95 |
| +10 | 22 | 3 | 4,00 | 4,00 | 4,00 |

Характер эффективности предлагаемых воздушных насосов будет зависеть от состояния влияния конфигурации воздухообмена воздушных тепловых насосов, а именно от приточно-вытяжной вентиляционной системы с рециркуляцией или с рекуперацией тепла вытяжного воздуха, обеспечивающего требуемый воздухообмен с минимальными теплотерями.

Рассмотрим возможный диапазон работы классического ВТН с установкой снаружи (вне строения) (ВТН), рециркуляционного воздушного теплового насоса (РВТН), рециркуляционного воздушного теплового насоса с рекуперацией (РВТНР), взяв за основу при их сравнении COP – коэффициент преобразования (эффективности), равный отношению $\frac{Q_{\text{полезн. (ном. тепл)}}}{P_{\text{эл. двигателя}}}$, при этом COP=1 электрического котла (ЭК) является нижним пределом, а COP=4 геотермального теплового насоса (ГТН)

будет служить его верхним пределом, к которому следует стремиться, чтобы добиться эффективной работы ВТН различных конфигураций.

Все модели ВТН, в нашем случае применимые для строений с диапазоном теплотерей здания от 2,4 до 6,4 кВт, имеют тепловую мощность P = 12 кВт (A10/W30) согласно паспортным данным P_{эл. двиг.} = 3,0 кВт, а следовательно, COP – коэффициент эффективности (преобразования) = 12кВт/3кВт = 4 при 10°C наружного воздуха.

Граничные условия по коэффициенту эффективности (преобразования) относительно различных моделей ВТН и ЭК и ГТН представлены на рис. 1 (график зависимости COP от температуры наружного воздуха рассматриваемых моделей ВТН).

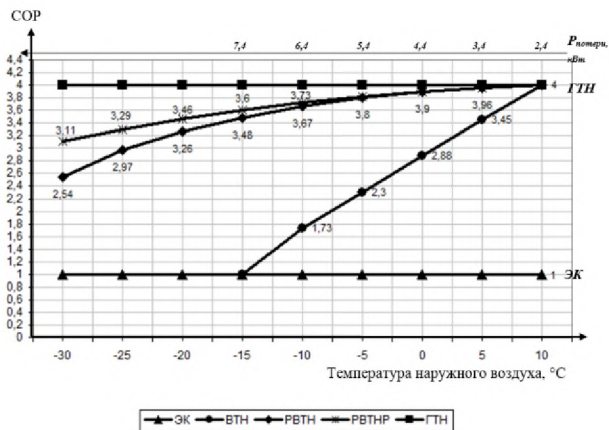


Рис. 1

На графике наглядно представлены зависимости COP $[COP = f(T_{нар}, °C)]$ от температуры наружного воздуха рассматриваемых конфигураций ВТН, РВТН и РВТНР, которые находятся в пределах от 1 (электрический котел) до 4 (тепловой насос) – ось Y [3]. Однако из диаграммы видно, что при низких температурах $-20^{\circ}C$ и ниже рассматриваемые модели ВТН,

РВТН и РВТНР нуждаются в необходимости включения на короткий срок в систему теплоснабжения маломощных электротеплов (ТЭН) для целей увеличения COP.

Значение коэффициента преобразования свидетельствует о возможности ВТН справляться с отоплением заданного объекта. Но в данном случае вырабатываемой мощности ВТН становится недостаточно для обеспечения отопительной нагрузки, поэтому требуется подключение дополнительного источника тепла, например, электрического ТЭНа. Таким образом, чтобы воздушный тепловой насос работал и при низких температурах, применяется комбинированная система отопления, то есть в схему отопления включается дополнительный генератор тепла [1].

В табл. 2 представлен расчет дополнительной тепловой мощности при использовании ТЭНа в системе теплоснабжения ВТН, РВТН и РВТНР.

Таблица 2

| $t_{нар.}$ возд., $^{\circ}C$ | Тепловые потери, кВт·ч | Работа ВТН, ч | Общие тепловые потери, кВт | COP | | | Тепловая мощность, кВт, ($P_{эл. движ} 3,0 \text{ кВт} \times COP$) | | | Дополнительная тепловая мощность, кВт | | |
|-------------------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------------|------|------|-------|--|-------|-------|---------------------------------------|--------|---------|
| | | | | ВТН | РВТН | РВТНР | ВТН | РВТН | РВТНР | ВТН | РВТН | РВТНР |
| 1 | 2 | 3 | 4=2×3 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11=2-8 | 12=2-9 | 13=2-10 |
| -30 | 10,4 | 67 | 696,8 | 1,00 | 2,54 | 3,11 | 3,0 | 7,62 | 9,33 | 7,4 | 2,78 | 1,07 |
| -25 | 9,4 | 104 | 977,6 | 1,00 | 2,97 | 3,29 | 3,0 | 8,91 | 9,87 | 6,4 | 0,49 | - |
| -20 | 8,4 | 286 | 2402,4 | 1,00 | 3,26 | 3,46 | 3,0 | 9,78 | 10,38 | 5,4 | - | - |
| -15 | 7,4 | 579 | 4284,6 | 1,00 | 3,48 | 3,60 | 3,0 | 10,44 | 10,8 | 4,4 | - | - |
| -10 | 6,4 | 1197 | 7660,8 | 1,73 | 3,67 | 3,73 | 5,19 | 11,01 | 11,19 | 1,21 | - | - |
| -5 | 5,4 | 1235 | 6669 | 2,30 | 3,80 | 3,82 | 6,9 | 11,4 | 11,46 | - | - | - |
| 0 | 4,4 | 683 | 3005,2 | 2,88 | 3,90 | 3,89 | 8,64 | 11,7 | 11,67 | - | - | - |
| +5 | 3,4 | 509 | 1730,6 | 3,45 | 3,96 | 3,95 | 10,35 | 11,88 | 11,85 | - | - | - |
| +10 | 2,4 | 110 | 264 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 12,0 | 12,0 | 12,0 | - | - | - |

Сравним эффективность работы различных моделей ВТН исходя из условий покрытия максимальной отопительной нагрузки объекта в наиболее низкие температуры наружного воздуха.

Расчеты временного режима работы моделей ВТН, нагревающих теплоноситель (воду) в буферной емкости $V=200 \text{ л}$ (м^3) от 30 до $60^{\circ}C$, $P_{тепл. мощность} = 12 \text{ кВт}$, представлены в табл. 3.

Таблица 3

| $t_{\text{наруж. возд.}}^{\circ\text{C}}$ | COP теоретический | | | Тепловые потери здания $P_{\text{потерь}}$, кВт·ч | Тепловая мощность, $Q_{\text{полезн}} = \text{COP} \cdot P_{\text{эл.двиг.}}$, кВт при $P_{\text{эл.двиг.}} = 3 \text{ кВт}$ | | | COP расчетный | | | Время работы $P_{\text{раб.}}$, мин | | |
|---|-------------------|------|-------|--|---|-------|-------|---------------|------|-------|--------------------------------------|------|-------|
| | ВТН | РВТН | РВТНР | | ВТН | РВТН | РВТНР | ВТН | РВТН | РВТНР | ВТН | РВТН | РВТНР |
| | | | | | | | | | | | | | |
| -30 | 1 | 2,54 | 3,11 | 10,4 | 3 | 7,62 | 9,33 | 0,29 | 0,73 | 0,90 | 208 | 82 | 67 |
| -25 | 1 | 2,97 | 3,29 | 9,4 | 3 | 8,91 | 9,87 | 0,32 | 0,95 | 1,05 | 188 | 63 | 57 |
| -20 | 1 | 3,26 | 3,46 | 8,4 | 3 | 9,78 | 10,38 | 0,36 | 1,16 | 1,24 | 168 | 52 | 49 |
| -15 | 1 | 3,48 | 3,6 | 7,4 | 3 | 10,44 | 10,8 | 0,41 | 1,41 | 1,46 | 148 | 43 | 41 |
| -10 | 1,73 | 3,67 | 3,73 | 6,4 | 5,19 | 11,01 | 11,19 | 0,81 | 1,72 | 1,75 | 74 | 35 | 34 |
| -5 | 2,3 | 3,8 | 3,82 | 5,4 | 6,9 | 11,4 | 11,46 | 1,28 | 2,11 | 2,12 | 47 | 28 | 28 |
| 0 | 2,88 | 3,9 | 3,89 | 4,4 | 8,64 | 11,7 | 11,67 | 1,96 | 2,66 | 2,65 | 31 | 23 | 23 |
| 5 | 3,45 | 3,96 | 3,95 | 3,4 | 10,35 | 11,88 | 11,85 | 3,04 | 3,49 | 3,49 | 20 | 17 | 17 |
| 10 | 4 | 4 | 4 | 2,4 | 12 | 12 | 12 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 12 | 12 | 12 |

Из расчетов в табл. 3 видно, что при температуре $t = -10^{\circ\text{C}}$ время работы классического ВТН составит более часа, так как в точке $P_{\text{потерь}} = 5,19 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ при $\text{COP} = 1,73$ ВТН не справляется с обогревом ввиду нехватки мощности, то есть $P_{\text{потерь}} = 6,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} > P_{\text{потерь}} = 5,19 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. В этом случае требуется дополнительная тепловая мощность, что составляет $6,4 - 5,19 = 1,21 \text{ кВт}$. А при температуре $t = -30^{\circ\text{C}}$ время работы классического ВТН увеличится до 3,5 ч (=208 мин: 60 мин), тогда как для работы РВТНР при той же температуре потребуется всего лишь чуть более часа (67 мин).

В данном примере с классическим ВТН температура $-10^{\circ\text{C}}$ называется температурой (точкой) бивалентности. При температурах ниже точки бивалентности тепловой насос может отключаться или работать в паре с дополнительным источником тепла, но при этом не покрывать всю потребность в тепле. В связи с этим необходимо прибегать к выбору комбинированного режима работы теплового насоса.

Тепловой насос в комбинированном режиме обеспечивает полную тепловую нагрузку здания, пока не достигнет точки бивалентного режима. После этого он отключается, а всю нагрузку берет на себя вспомогательный дополнительный генератор тепла, который обеспечивает необходимый температурный график. Также можно при достижении точки бивалентного режима тепловой насос не отключать, а обеспечить совместную его работу в паре с дополнительным генератором тепла. В та-

ком случае мощность дополнительного источника нагрева может выбираться исходя из недостающей мощности пиковой нагрузки. А мощность теплового насоса подбирается для точки бивалентного режима.

Следовательно, конфигурация ВТН должна подбираться таким образом, чтобы обеспечивать и основную – базовую отопительную нагрузку, и максимальную, что будет соответствовать оптимальной надежности системы теплоснабжения.

При использовании резервного источника тепла только в наиболее холодные периоды электроэнергии для подключения и эксплуатации различной конфигурации ВТН потребуется в 3 раза меньше, чем необходимо, например, классическому ВТН или электродкотлу. При этом рассмотренные конфигурации ВТН будут выдавать максимальный COP, который является основным критерием оценки эффективности теплового насоса согласно современным европейским стандартам EN14511 и EN255.

Однако согласно европейским стандартам более точно потребление электроэнергии в отопительный сезон рекомендуется определять с помощью коэффициента SCOP, который учитывает изменения температуры теплоносителя на протяжении всего периода отопления и представляет собой среднее значение всех единовременных COPов в отопительном сезоне для определенной климатической зоны.

ВЫВОДЫ

1. Выбор режима работы и номинальной мощности теплового насоса зависит как от источника низкопотенциальной энергии, так и от типа отопительной системы в здании. Энергосберегающее комбинированное отопление подразумевает работу теплового насоса в сочетании с другим нагревательным прибором: газовым, электрическим, твердотопливным котлом и др. Выбор данного режима может быть обусловлен также необходимостью подачи более высокой температуры в систему отопления при низких наружных температурах воздуха.

2. Тепловой насос, как основной источник теплоснабжения, работая в комбинированном режиме, может обеспечивать до 90...95% необходимого тепла. На практике наиболее распространенными являются вспомогательный и комбинированный моноэнергетический режим работы теплового насоса. Точка моноэнергетического режима может быть разной, в зависимости от типа отопительной системы и типа теплового насоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 фреонов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2017, № 1. С. 179...184.

2. Федосеев В.Н., Петрухин А.Б., Зайцева И.А. Алгоритм расчета энергоемкости воздухообмена воздушного теплового насоса с рециркуляцией для малоэтажного строения // Информационная среда вуза. – Иваново: ИВГПУ, 2016. С. 287...294.

3. Воронов В.А., Емелин В.А., Федосеев В.Н., Зайцева И.А. Климатические условия и факторы, влияющие на производительность воздушного теплового насоса // Сб. науч. тр.: Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений. – Иваново: ИВГПУ, 2015. С. 185...189.

4. Федосеев В.Н., Петрухин А.Б., Емелин В.А., Воронов В.А., Зайцева И.А. Энергоэффективность рабочего тела (хладона) воздушного теплового насоса в режиме обогрева автономного текстильного цеха (производства) // Сб. науч. тр.: Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений. – Иваново: ИВГПУ, 2016. Вып. 2. С. 186...193.

5. Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Емелин В.А., Воронов В.А. Энергоэффективный расчет отопления автономного строения на основе воздушного теплового насоса // Сб. науч. тр.: Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений. – Иваново: ИВГПУ, 2016. Вып. 2. С. 181...185.

REFERENCES

1. Alojan R.M., Fedoseev V.N., Petruhin A.B., Zajceva I.A., Vinogradova N.V., Ostrjakova Ju.E. Jеffektivnost' otoplenija teplovym nasosom avtonomnyh tekstil'nyh proizvodstv v zavisimosti ot urovnja termodinamicheskoj aktivnosti freonov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2017, № 1. S. 179...184.

2. Fedoseev V.N., Petruhin A.B., Zajceva I.A. Algoritm rascheta jenergoemkosti vozduhoobmena vozdushnogo teplovogo nasosa s recirkulaciej dlja malojetazhnogo stroenija // Informacionnaja sreda vuza. – Ivanovo: IVGPU, 2016. S. 287...294.

3. Voronov V.A., Emelin V.A., Fedoseev V.N., Zajceva I.A. Klimaticheskie uslovija i faktory, vlijajushhie na proizvoditel'nost' vozdushnogo teplovogo nasosa // Sb. nauch. tr.: Teorija i praktika tehniceskikh, organizacionno-tehnologicheskikh i jekonomiceskikh reshenij. – Ivanovo: IVGPU, 2015. S. 185...189.

4. Fedoseev V.N., Petruhin A.B., Emelin V.A., Voronov V.A., Zajceva I.A. Jenergojеffektivnost' rabocheho tela (hladona) vozdushnogo teplovogo nasosa v rezhime obogreva avtonomnogo tekstil'nogo ceha (proizvodstva) // Sb. nauch. tr.: Teorija i praktika tehniceskikh, organizacionno-tehnologicheskikh i jekonomiceskikh reshenij. – Ivanovo: IVGPU, 2016. Vyp.2. S. 186...193.

5. Fedoseev V.N., Zajceva I.A., Emelin V.A., Voronov V.A. Jenergojеffektivnyj raschet otoplenija avtonomnogo stroenija na osnove vozdushnogo teplovogo nasosa // Sb. nauch. tr.: Teorija i praktika tehniceskikh, organizacionno-tehnologicheskikh i jekonomiceskikh reshenij. – Ivanovo: IVGPU, 2016. Vyp. 2. S. 181...185.

Рекомендована кафедрой организации производства и городского хозяйства. Поступила 20.10.17.