Литература

1. Global landscape of renewable energy transition finance 2025 / International Renewable Energy Agency (IRENA). – URL: https://www.irena.org (дата обращения: 06.01.2026).
2. Sanclemente Lozano, M. Techno-economic assessment of solar hybrid system with high-temperature heat pump for industrial heat generation / M. Sanclemente Lozano, S. Trevisan, R. Guedez // SolarPACES Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3. – Article 2426. – DOI: 10.52825/solarpaces.v3i.2426. – URL: https://doi.org/10.52825/solarpaces.v3i.2426 (дата обращения: 06.01.2026).
3. Environmental benefits and economic feasibility of a photovoltaic assisted heat pump water heater / ResearchGate. – URL: https://www.researchgate.net/publication/388578575 (дата обращения: 06.01.2026).

ТЕПЛОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ С АККУМУЛЯТОРАМИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

К. Д. Кировский, Е. Е. Петюлевич

Учреждение образования «Национальный детский технопарк», г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель И. А. Некало

Рассмотрена эффективность совместного использования теплового аккумулятора с теплонасосными установками.

Ключевые слова: теплонасосные установки, тепловые аккумуляторы, эффективность, COP.

В Республике Беларусь энергосбережение и переход на возобновляемые источники энергии становятся приоритетными задачами [1]. Одним из наиболее перспективных решений в этой области является использование теплонасосных установок (ТНУ), способных эффективно трансформировать низкопотенциальное тепло окружающей среды для нужд отопления и горячего водоснабжения [2].

Теплонасосные установки принято классифицировать по принципу действия (парокомпрессионные, адсорбционные, абсорбционные) или по источнику тепловой энергии низкого потенциала [2]. В данной работе будут рассмотрены парокомпрессионные ТНУ, использующие воздух, как низкопотенциальный источник энергии. Принципиальная схема ТНУ типа «воздух – вода» представлен на рис. 1.

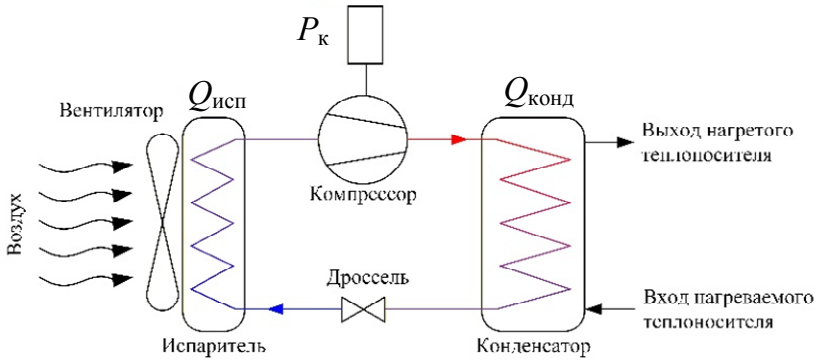


Рис. 1. Принципиальная схема ТНУ типа «воздух – вода»
Примечание. Собственная разработка автора.

Главным недостатком данного типа ТНУ является его низкая эффективность при слишком низких температурах наружного воздуха. На лабораторном стенде «Тепловой насос» в Национальном детском технопарке была получена зависимость мощности компрессора ТНУ от температуры низкопотенциального источника (рис. 2).

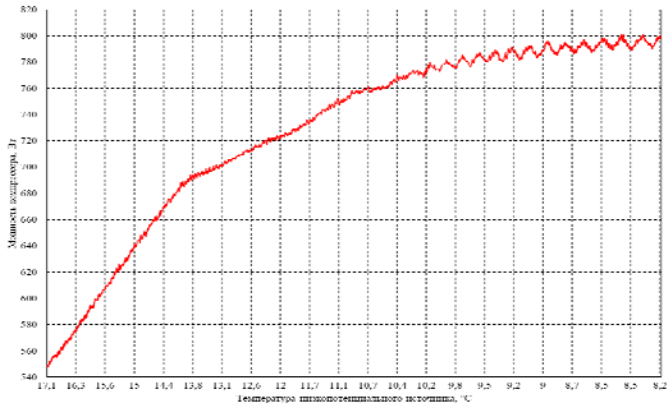
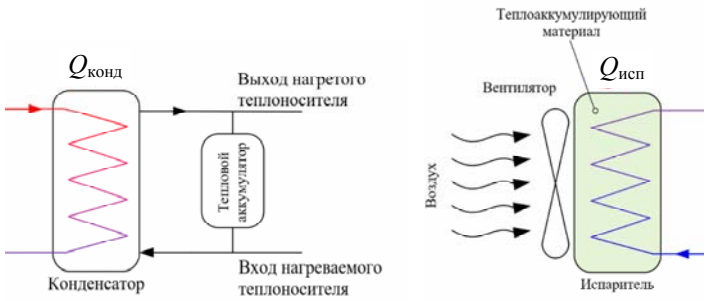


Рис. 2. Зависимость мощности компрессора ТНУ
от температуры низкопотенциального источника энергии
Примечание. Собственная разработка автора.

Чем больше перепад между температурами наружного воздуха и требуемой температуры в конденсаторе, тем будет ниже коэффициент преобразования COP [2]. Еще одним недостатком воздушных ТНУ является их обледенение в холодном и влажном климате, что также приводит к снижению коэффициента COP [2, 3–5].

Решением двух вышеизложенных недостатков воздушных ТНУ будет применение тепловых аккумуляторов (ТА). Тепловые аккумуляторы могут выполняться в виде бака-аккумулятора воды (бойлер) или кожухо-трубной, капсульной системы, в которые будет запечатан теплоаккумулирующий материал [6]. На рис. 2 представлены два схемных решения внедрения теплового аккумулятора.



а) *б*)

Рис. 3. Схемные решение внедрения теплового аккумулятора:
а – ТА после конденсатора; *б* – ТА внедренный в испаритель
Примечание. Собственная разработка автора.

Схемное решение на рис. 3, *а* предполагает использование бака-аккумулятора для нагрева воды в период максимально высокой температуры наружного воздуха. Однако максимальная температура наружного воздуха совпадает с временем высокого тарифа на электроэнергию, поэтому эффективность данного решения нивелируется периодом высокой стоимости электроэнергии (при условии дифференциальных тарифов на электроэнергию).

В случае второго схемного решения (рис. 3, *б*) предлагается внедрить теплоаккумулирующий материал с испарителем ТНУ, что позволит сохранить высокую температуру для испарителя и повысить коэффициент COP.

На рис. 2 наблюдается линейная зависимость роста мощности на компрессоре ($P_{эл}$) (от снижения температуры окружающего воздуха (T). Линейная зависимость будет рассматриваться приближенно по формуле

$$P_{эл}(T) = aT + b.$$

Примем, что при температуре окружающего воздуха в 17 °С мощность компрессора составит 550 Вт, а при 8 °С – 800 Вт (рис. 2), тогда коэффициент a будет равен:

$$a \approx \frac{800 - 550}{8 - 17} = -27{,}8 \text{ Вт/}^{\circ}\text{С}.$$

То есть при понижении температуры на 1 °С мощность возрастает примерно на 28 Вт.

Для количественной оценки эффективности работы ТНУ до и после модернизации используется расчет коэффициента преобразования COP по формуле

$$\text{COP}(T) = Q_{конд} / P_{эл}(T),$$

где $Q_{конд}$ – тепловая нагрузка, отбираемая от конденсатора ТНУ, кВт.

Сравнение значений COP, полученных для базовой и модернизированной конфигураций (рис. 3, *б*), позволяет сделать вывод об энергетической эффективности проведенных изменений.

Представим линейное приближение изменения коэффициента COP от температуры наружного воздуха в программе Microsoft Excel для ТНУ теплопроизводительности 10 кВт:

$$\text{COP}(T) = 2{,}4615 + 0{,}0769T.$$

Для использования ТНУ в качестве теплоисточника для нагрева воды в системе водоснабжения здания, необходимо соблюсти санитарные нормы – температура воды не ниже 50 °С, во избежания образования бактерий легионеллы [7].

Расчет проводился с наибольшим перепадом (ΔT) между ночной (min) и дневной (max) температурой наружного воздуха за период 2024 и 2025 гг. (г. Минск). Результаты расчета занесены в таблицу.

Результаты расчета эффективности модернизации ТНУ

Месяц	ΔT, °C	COP_{max}	COP_{min}	$COP_{без\ ТА}$	Экономия, %
Май	7,90	4,05	3,44	3,74	8,12
Июнь	6,54	4,25	3,74	3,99	6,30
Июль	6,26	4,40	3,92	4,16	5,79
Август	7,33	4,39	3,83	4,11	6,85
Сентябрь	8,75	4,26	3,58	3,92	8,58
Октябрь	3,59	3,30	3,03	3,16	4,36
Ноябрь	1,16	2,74	2,65	2,69	1,65
Декабрь	0,95	2,57	2,49	2,53	1,44
Январь	1,08	2,61	2,53	2,57	1,62
Февраль	3,68	2,38	2,10	2,24	6,32
Март	5,40	3,13	2,71	2,92	7,11
Апрель	6,89	3,53	3,00	3,26	8,12

Применение ТА на испарителе повышает COP и снижает потребление электроэнергии при заряде теплового аккумулятора днем и разряде в ночь. Однако данные показатели незначительны, особенно в зимний период, где суточный температурный диапазон составляет не более 5 °C.

Литература

1. О Государственной программе «Устойчивая энергетика и энергоэффективность» на 2026–2030 годы : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 22 янв. 2026 г., № 30 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. – URL: https://pravo.by (дата обращения: 01.04.2026).
2. Тепловые насосы в современной промышленности и коммунальной инфраструктуре : информ.-метод. изд. / Е. Г. Гашо, С. А. Козлов, В. С. Пузаков [и др.]. – М. : Перо, 2016. – 204 с.
3. The Future of Heat Pumps in China / International Energy Agency, Tsinghua University Building Energy Research Center. – Paris : IEA, 2024. – 153 p.
4. Rethinking peak load in district heating: Operational insights and techno-economic pathways / H. Ali, A. Volkova, A. Dedov, S. Moser // Energy Reports. – 2026. – Vol. 15. – Art. 109061. – DOI 10.1016/j.egyr.2026.109061
5. Air-source ammonia heat pump for district heating: a field modeling approach with focus on frosting-defrosting cycles / A. F. Passarelli, U. Merlo, F. Pelella [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2026. – Vol. 282, 128790. – DOI 10.1016/j.applthermaleng.2025.128790
6. Петюлевич, Е. Е. Исследование теплоаккумулирующих материалов: парафин и тригидрат ацетат натрия / Е. Е. Петюлевич, В. В. Драбко // Молодой ученый : сб. ст. XV Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч., Пенза, 15 авг. 2025 г. – Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2025. – Т. 15. – С. 55–61. – EDN INOUHU.
7. Гигиенические требования к устройству и эксплуатации систем централизованного горячего водоснабжения : санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы : утв. Постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 30 дек. 2009 г. № 142. – Минск, 2009. – 32 с.