

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТОРОВ НА КРЕСТООБРАЗНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ В СИСТЕМАХ ВЕНТИЛЯЦИИ МАЛЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦЕХОВ

Петренко Д.М.

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,  
Институт «Академия строительства и архитектуры»,  
295493, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 181.  
E-mail: iliya.angeluck@yandex.ru

**Аннотация.** В статье представлено технико-экономическое обоснование внедрения локальных систем рекуперации воздуха на базе крестообразных тепловых труб в условиях малых производственных цехов с повышенным содержанием пыли. На примере климатических условий г. Симферополя проведён сравнительный анализ капитальных и эксплуатационных затрат для четырёх вариантов организации приточно-вытяжной вентиляции: газовый калорифер, электрический калорифер, пластинчатый рекуператор и предложенная установка на крестообразных тепловых трубах. Рассчитаны простой и дисконтированный сроки окупаемости, а также коэффициент экономической эффективности.

**Предмет исследования:** технико-экономические показатели рекуператора на крестообразных тепловых трубах.

**Материалы и методы:** в ходе исследования применялись материалы и методы, касаемые технико-экономического обоснования внедрения технически сложных систем, в условиях рыночных отношений стран с развивающейся экономикой.

**Результаты:** получены результаты технико-экономической оценки, простой срок окупаемости составил 0,76 года, дисконтированный срок окупаемости – 0,87 года, коэффициент экономической эффективности равен 1,308.

**Выводы:** Технико-экономическое обоснование подтвердило целесообразность внедрения рекуператоров на крестообразных тепловых трубах. Экономический эффект достигается за счёт снижения потребления традиционных энергоносителей и минимизации эксплуатационных расходов на обслуживание. Конструктивные особенности крестообразных тепловых труб (физическое разделение потоков, устойчивость к пылевым отложениям, низкое гидравлическое сопротивление) обеспечивают стабильность технико-экономических показателей на протяжении всего жизненного цикла установки/

**Ключевые слова:** рекуперация тепла, крестообразные тепловые трубы, срок окупаемости, энергоэффективность, технико-экономическое обоснование, системы вентиляции малых производств.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергопотребление систем приточно-вытяжной вентиляции составляет значительную долю эксплуатационных расходов производственных и гражданских зданий. Утилизация тепловой энергии вытяжного воздуха с помощью рекуперативных теплообменников является наиболее технологичным способом снижения затрат на подогрев приточного воздуха. Однако традиционные пластинчатые и роторные рекуператоры в условиях малых производственных цехов (деревообработка, металлообработка, сборочные участки) сталкиваются с эксплуатационными ограничениями: быстрое загрязнение каналов, снижение тепловой эффективности на 25–40% в первый год эксплуатации, рост аэродинамического сопротивления и необходимость частого сервисного обслуживания [1-2].

Альтернативным решением выступает применение рекуператоров на основе тепловых труб (термосифонов), которые обеспечивают физическое разделение потоков, устойчивость к запылённости и возможность модульного масштабирования. Несмотря на подтверждённые теплогидравлические преимущества крестообразного профиля тепловых

труб [3-6], вопросы экономической целесообразности их интеграции в типовые вентиляционные тракты малых предприятий остаются недостаточно формализованными. Целью данной работы является количественное технико-экономическое обоснование применения рекуператора на крестообразных тепловых трубах.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Проведение технико-экономического обоснования осуществлялось на основе методики, изложенной в статье [7], с учетом исследований, представленных в монографиях [8, 9], а также нормативной документации [10–13]. В работе применён комплексный сравнительный подход, включающий формирование капитальных (К) и эксплуатационных (Э) затрат для четырёх альтернативных вариантов организации приточно-вытяжной вентиляции: газовый калорифер, электрический калорифер, пластинчатый рекуператор и предложенная установка на крестообразных тепловых трубах.

Методическая основа [7] определяет алгоритм сопоставления дисконтируемых денежных потоков и расчёт интегральных показателей инвестиционной эффективности. Монографические

источники [8, 9] используются для формирования сметной структуры затрат, определения нормативных амортизационных отчислений и учёта косвенных издержек монтажных и пусконаладочных работ. Нормативная база [10–13] обеспечивает привязку расчётов к региональным климатическим условиям (г. Симферополь), санитарно-гигиеническим требованиям к воздухообмену в производственных помещениях, а также к действующим тарифам на энергоресурсы и сметным расценкам.

Важное место в мировой научной литературе занимают вопросы применения теплообменников на основе тепловых труб (Heat Pipe Heat Exchanger, HPHE) для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC). В обзорной работе Faisal с соавторами [14] проведён всесторонний анализ использования HPHE в HVAC-приложениях. Авторы отмечают, что HVAC-системы являются одними из крупнейших потребителей энергии, а необходимость постоянного обновления воздуха (особенно после пандемии COVID-19) значительно увеличила энергопотребление этого сектора. Утилизация тепла вытяжного воздуха рассматривается как эффективный способ снижения потребления энергии в HVAC-системах, причём HPHE обладают значительным потенциалом для решения этой задачи. В обзоре охвачены различные конструкции тепловых труб, включая обычные, термосифоны, пульсирующие и другие инновационные конфигурации [14].

Общие преимущества теплообменников на тепловых трубах по сравнению с традиционными решениями систематизированы в обзорной статье группы китайских исследователей [15]. К таким преимуществам относятся высокая компактность, возможность гибкой компоновки, полное разделение горячего и холодного теплоносителей (практически исключая перекрёстную утечку), а также хорошие изотермические характеристики [15]. Эти свойства делают HPHE особенно привлекательными для систем утилизации тепла, где требуется предотвратить смешение потоков.

Экспериментальные и теоретические исследования HPHE для рекуперации тепла вытяжного воздуха провели Ali и Sarsam [16]. В своей работе они создали экспериментальный стенд и разработали математическую модель теплообменника на основе тепловых труб. Результаты показали прямую зависимость теплового потока от температуры и расхода воздуха на входе в испаритель. Наивысшая эффективность HPHE была достигнута при 100% заполнении и определённом соотношении теплоёмкостей потоков. Расхождение между расчётными и экспериментальными значениями температур на выходе из конденсатора не превысило 3%, что подтверждает адекватность предложенной модели [16].

Экономические аспекты применения HPHE в системах кондиционирования воздуха подробно

рассмотрены Sanaye и Talae [17]. Авторы выполнили термоэкономический анализ теплообменника на тепловых трубах с фитильной структурой и метанолом в качестве рабочего тела. Расчёт теплопередачи проводился методом  $\varepsilon$ -NTU с учётом соответствующего теплового сопротивления тепловой трубы. Помимо теплового расчёта, была выполнена экономическая оценка, учитывающая первоначальные (инвестиционные) и эксплуатационные затраты, а также годовую экономию от утилизации тепла [17].

Применение методов вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования теплообменников на основе тепловых труб продемонстрировано в работе Ramos с соавторами [18]. Авторы охарактеризовали перекрёстноточный теплообменник на тепловых трубах с использованием решателя ANSYS Fluent. Был разработан и валидирован инструмент для проектирования и прогнозирования производительности тестового устройства путём сравнения CFD-модели с предыдущими экспериментальными результатами [18]. Это подтверждает возможность использования численного моделирования для оптимизации геометрии рекуператора, включая предлагаемую в настоящей работе крестообразную конфигурацию.

Вопросы эксплуатации тепловых труб в сложных условиях затронуты в материалах сборника «Heat Pipe Technology: Volume 2. Materials and Applications» [19]. В одной из глав этого сборника указывается, что теплота запылённого и влажного воздуха наиболее эффективно утилизируется теплообменниками, состоящими из отдельных тепловых труб с индивидуальным оребрением. Их преимущества включают простоту очистки поверхности и лёгкость удаления конденсата [19]. Это положение напрямую подтверждает конструктивный выбор авторов настоящей статьи и его актуальность для условий малых производственных цехов с повышенной запылённостью.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Годовая потребность в тепле для подогрева приточного воздуха в системе вентиляции производственного помещения определяется по формуле:

$$Q = \frac{Q_{\text{вент}} \cdot 24 \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{ср}}) \cdot n}{(t_{\text{вн}} - t_{\text{от}})}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{вент}} = \frac{L_{\text{вент}} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_{\text{вн}} - t_{\text{от}})}{3600}, \quad (2)$$

где:  $Q$  – годовая потребность в тепле (кВт/год);  $Q_{\text{вент}}$  – необходимая мощность калорифера для нагрева приточного воздуха (кВт);  $L_{\text{вент}}$  – объёмный расход воздуха ( $\text{м}^3/\text{час}$ );  $\rho$  – плотность воздуха ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $c$  – удельная теплоёмкость воздуха ( $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ );  $t_{\text{от}}$  – температура наружного воздуха по параметру Б ( $^\circ\text{C}$ );  $t_{\text{ср}}$  – среднее значение температуры наружного

воздуха за отопительный период (°C);  $t_{вн}$  - расчетная температура воздуха внутри помещения в холодный период года (°C);  $n$  - продолжительность отопительного периода (дней).

Формула расчёта капитальных вложений ( $K_i$ ) для  $i$ -го варианта см. ниже:

$$K_i = S_{рту} + S_{раб.ту} + S_{конс.ту}, \quad (3)$$

где:  $S_{рту}$  - стоимость расходных материалов (воздуховоды, крепёж, изоляция, компоненты подключения) (руб.);  $S_{раб.ту}$  - стоимость рабочих операций (монтаж оборудования, сборка воздуховодов, пусконаладочные работы) (руб.);  $S_{конс.ту}$  - стоимость готовых конструкций (основное оборудование: калориферы, рекуператоры, вентиляторы, автоматика) (руб.).

Формула расчета эксплуатационных затрат ( $\mathcal{E}_i$ ) для  $i$ -го варианта см. ниже:

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{газ} + \mathcal{E}_{эл} + \mathcal{E}_{ам}, \quad (4)$$

где:  $\mathcal{E}_{газ}$  - эксплуатационные затраты на газ (руб.);  $\mathcal{E}_{эл}$  - эксплуатационные затраты на электроэнергию (руб.);  $\mathcal{E}_{ам}$  - годовые амортизационные отчисления (руб.).

$$\mathcal{E}_{ам} = \frac{1,5 \cdot K}{T_{ам}}, \quad (5)$$

где:  $K$  - капитальные затраты на строительство системы (руб.);  $T_{ам}$  - расчетный срок эксплуатации системы (лет).

Совокупные дисконтируемые затраты для всех четырех вариантов компоновки систем определяются по формуле:

$$СДЗ = K \cdot \left(1 + \frac{p}{100}\right)^T + \mathcal{E} \cdot \left(\left(1 + \frac{p}{100}\right)^T - 1\right) \cdot \frac{100}{p}, \quad (6)$$

где:  $K$  - капитальные затраты соответствующего варианта (руб.);  $\mathcal{E}$  - эксплуатационные затраты соответствующего варианта (руб.);  $p$  - норма дисконта, 15,5 %;  $T$  - № года по счету для которого определяется СДЗ.

Простой срок окупаемости системы с рекуператором на основе крестообразных тепловых труб (вариант 4) по сравнению с базовой системой с электрическим калорифером (вариант 2) определяется по формуле (4.37):

$$T_0 = \frac{K_4 - K_2}{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_4}, \quad (7)$$

Дисконтированный срок окупаемости, который определяются по формуле:

$$T_{ок} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{p \cdot T_0}{100}\right)}{\ln\left(1 + \frac{p}{100}\right)}, \quad (8)$$

Коэффициент экономической эффективности системы:

$$E_K = \frac{\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_4}{K_4 - K_2}, \quad (9)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В ходе сравнительного анализа установлено, что капитальные затраты на систему с газовым калорифером составили 89 500 руб., с электрическим калорифером – 78 200 руб., с пластинчатым рекуператором – 100 557 руб. Капитальные затраты на систему с рекуператором на крестообразных тепловых трубах определены в размере 115 400 руб., что обусловлено стоимостью материалов (медь), спецификой изготовления теплообменного блока и монтажных работ.

Совокупные дисконтированные затраты определяются для каждого года эксплуатации систем и визуализируются в форме графика (рисунок 1).

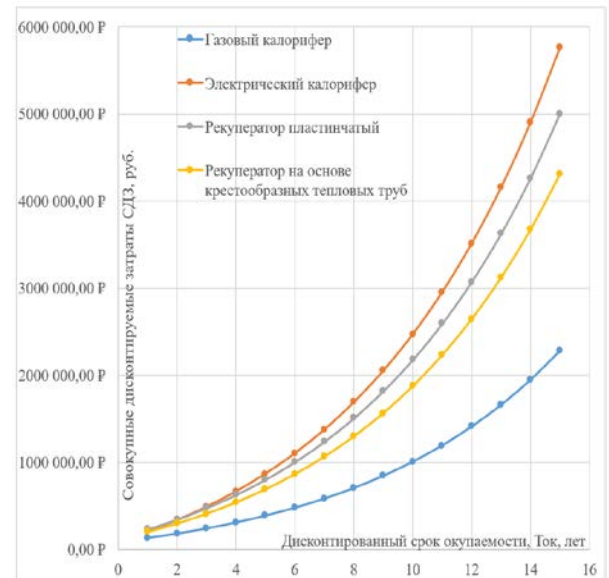


Рис. 1. График совокупных дисконтируемых затрат.

Fig. 1. Cumulative discounted cost chart.

На основании расчётных данных определены показатели экономической эффективности внедрения предложенного рекуператора относительно электрического калорифера как базового:

- простой срок окупаемости:  $T_0 = 0,76$  года;
- дисконтированный срок окупаемости:  $T_{ок} = 0,87$  года;
- коэффициент экономической эффективности:  $E_K = 1,308$ .

Результаты сравнительного анализа капитальных, эксплуатационных и совокупных дисконтированных затрат, а также рассчитанные показатели экономической эффективности для всех четырех рассматриваемых вариантов систем вентиляции систематизированы в таблице 1.

**Таблица 1.** Капитальные, эксплуатационные и интегральные затраты, а также показатели окупаемости для четырёх вариантов организации приточно-вытяжной вентиляции.

**Table 1.** Capital, operating and cumulative discounted costs, as well as payback indicators for four configurations of supply and exhaust ventilation.

Показатель	Газовый калорифер	Электрический калорифер	Пластинчатый рекуператор	Рекуператор на крестообразных тепловых трубах
Капитальные затраты, руб.	86 500	89 500	132 500	115 400
Эксплуатационные затраты, руб./год	30 884	100 557	77 637	66 678
Совокупные дисконтированные затраты за 10 лет, руб.	1 008 030	2 470 323	2 175 121	1 874 861
Простой срок окупаемости (относительно эл. калорифера), лет	—*	базовый	1,88	0,76
Дисконтированный срок окупаемости, лет	—*	базовый	2,39	0,87
Коэффициент экономической эффективности	—*	—	0,533	1,308

\*Примечание: для газового калорифера капитальные и эксплуатационные затраты ниже, чем у электрического калорифера, поэтому классические показатели окупаемости (простой, дисконтированный, коэффициент экономической эффективности) относительно электрического калорифера не рассчитываются. Электрический калорифер принят за базовый вариант для оценки эффективности рекуператоров.

Для углублённой оценки экономической эффективности рассматриваемых систем вентиляции был выполнен расчёт удельной стоимости 1 Гкал тепловой энергии, выработанной каждой из систем, на всём протяжении расчётного периода (15 лет). Данный показатель позволяет нивелировать разницу в капитальных затратах и даёт корректную основу для сравнения с альтернативными источниками теплоснабжения, в частности – с подключением к централизованной тепловой сети города.

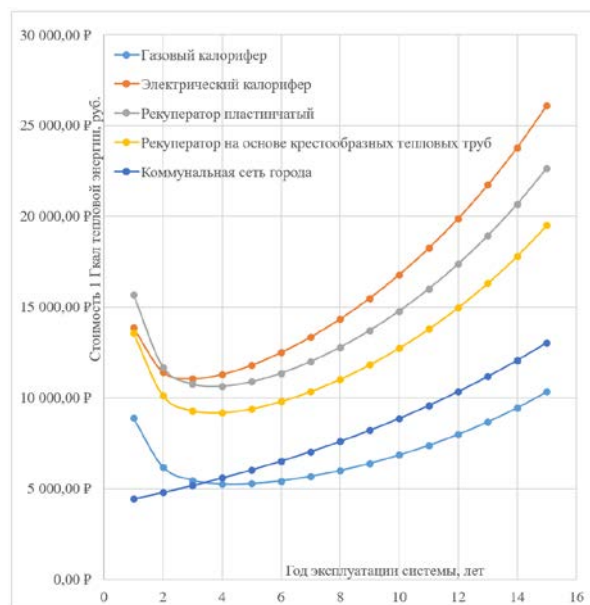
Расчёт удельной стоимости производился по следующей методике. Для каждого года эксплуатации системы Т (от 1 до 15) определялись совокупные дисконтированные затраты (СДЗ) нарастающим итогом с учётом капитальных вложений, ежегодных эксплуатационных расходов (включая топливо, электроэнергию, амортизацию) и нормы дисконта  $p = 15,5\%$ . Затем величина СДЗ(Т) делилась на суммарное количество выработанной тепловой энергии за Т лет, где годовая потребность в тепле на нагрев приточного воздуха составляет  $Q_{год} = 17\,127 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$  (что эквивалентно  $14,72 \text{ Гкал/год}$ ). Таким образом, удельная стоимость 1 Гкал в году Т вычислялась как:

$$c_{уд}(T) = \frac{СДЗ(T)}{Q_{год} \cdot T}, \quad (10)$$

Для сопоставления с внешним теплоснабжением в расчёт была включена также стоимость тепловой энергии, получаемой из коммунальной тепловой сети г. Симферополя. Базовый тариф на тепловую энергию на 2026 год принят в размере  $4\,108,03$

руб./Гкал. На основе анализа динамики тарифов за предыдущие 5 лет установлен среднегодовой темп роста  $8\%$ . Прогнозная стоимость тепла от сети в году Т (начиная с  $T=1$ ) определялась как  $T_{сеть} = 4108,03 \cdot 1,08^T$ . При этом капитальные вложения в подключение к сетям не учитывались, так как для малого производственного цеха такое подключение часто связано с дополнительными затратами на врезку, прокладку трубопроводов и оформление разрешений, что заведомо ухудшает экономику централизованного варианта.

Результаты расчётов, визуализированные на рисунке 2, позволяют сделать следующие наблюдения.



**Рис. 2.** График стоимости тепловой энергии для сравнимых систем в условиях города Симферополя.

**Fig. 2.** Graph of the heat energy cost for the compared systems under the conditions of Simferopol.

Полученные значения свидетельствуют о высокой инвестиционной привлекательности технического решения. Сравнительный анализ

удельной стоимости 1 Гкал тепловой энергии показал, что после прохождения точки окупаемости эксплуатационные затраты в системе с рекуператором на крестообразных тепловых трубах оказываются на 20–30 % ниже по сравнению с системой на электрическом калорифере и на 14–15 % ниже, чем в системе с пластинчатым рекуператором. Данное преимущество обусловлено, в том числе, конструктивными особенностями крестообразного профиля: в отличие от пластинчатых аналогов, предложенная конструкция не требует увеличения мощности вентиляторов более чем на 5–7 % даже при длительной эксплуатации в запылённой среде, что дополнительно снижает статью затрат на электроэнергию для привода воздушного потока.

## ВЫВОДЫ

1. Проведённое технико-экономическое обоснование подтвердило целесообразность внедрения рекуператоров на крестообразных тепловых трубах в системы вентиляции малых производственных цехов. Простой срок окупаемости относительно электрического подогрева составляет 0,76 года, дисконтированный – 0,87 года при норме дисконта 15,5 %.

2. Коэффициент экономической эффективности  $E_K = 1,308$  указывает на высокую инвестиционную привлекательность решения. Экономический эффект достигается за счёт снижения потребления традиционных энергоносителей и минимизации эксплуатационных расходов на обслуживание.

3. Конструктивные особенности крестообразных тепловых труб (физическое разделение потоков, устойчивость к пылевым отложениям, низкое гидравлическое сопротивление) обеспечивают стабильность технико-экономических показателей на протяжении всего жизненного цикла установки, что делает предложенное решение перспективным для масштабирования в условиях малой промышленности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление: Учебник для вузов. – М.: Издательство АСВ, 2008. – 576 с.

2. Васильев, Г.П. Источник вторичных энергоресурсов – вентиляционные выбросы жилых квартир / Г.П. Васильев, Н.А. Тимофеев, А.А. Бурмистров // Журнал «Энергосбережение». – 2010. – №4. – С. 14-18.

3. О.Н., Ангелюк И.П., Петренко Д.М. Критический анализ существующих схем рекуперации воздуха / Журнал «Строительство и техногенная безопасность» – 53-57 с.

4. Зайцев О.Н., Ангелюк И.П., Петренко Д.М. Системы рекуперации воздуха: сравнительный анализ преимуществ и недостатков / Методология безопасности среды жизнедеятельности // Сборник

научных трудов XVIII Международной научно-практической конференции. Симферополь, 2025 – 528-532 с.

5. Зайцев О.Н., Ангелюк И.П., Петренко Д.М., Захаров А.С. Исследование тепловой эффективности и аэродинамических характеристик рекуператора с крестообразными тепловыми трубами методами CFD-моделирования / Журнал Парадигма // номер 3-1, 2026. – 228-238 с.

6. Зайцев О.Н., Ангелюк И.П., Петренко Д.М., Захаров А.С. Численное моделирование теплообмена и гидродинамики в рекуператоре воздуха на основе тепловых труб / Журнал Парадигма // номер 2-2, 2026. – 178-185 с.

7. Зайцев, О. Н. Технико-экономическое обоснование использования системы рекуперации теплоты дымовых газов / О. Н. Зайцев, И. П. Ангелюк // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 16 (68). – С. 99–104.

8. Арdziнов, В. Д. Сметное дело в строительстве / В. Д. Арdziнов, Н. И. Барановская, А. И. Курочкин. – СПб.: Питер, 2009. – 377 с.

9. Пашенцев, А. И. Стратегическое управление экономической безопасностью: учеб. пособие / А. И. Пашенцев, Г. Н. Ротанов, А. В. Финогентова, Е. Н. Ситникова. – Симферополь: ДИАПИ, 2019. – 274 с.

10. СП 60.13330.2012 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. – М.: Аналитик, 2012. – 81 с.

11. СП 131.13330.2012 Строительная климатология: актуализированная редакция СНиП 23-01-99. – М.: ЦПП, 2012. – 109 с.

12. СП 56.13330.2021 Производственные здания: актуализированная редакция СНиП 31-03-2001. – М.: РСТ, 2021. – 67 с.

13. Постановление Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» (с изм. и доп. на 01.01.2026).

14. Faisal Z.A., Eidan A.A., Al-Manea A. Review of the effectiveness of heat pipe heat exchangers for waste heat recovery in HVAC systems // Engineering Research Express. – 2025. – Vol. 7. – P. 032504. DOI: 10.1088/2631-8695/ae05e7.

15. Zhang D., Tao W.Q., He Y.L. Review of Recent Applications of Heat Pipe Heat Exchanger Use for Waste Heat Recovery // Energies. – 2024. – Vol. 17 (11). – P. 2504. DOI: 10.3390/en17112504.

16. Ali S.M., Sarsam W.S. Theoretical and experimental investigation of a heat pipe heat exchanger for energy recovery of exhaust air // Heat Transfer. – 2022. – Vol. 51 (4). – P. 3600–3619. DOI: 10.1002/htj.22466.

17. Sanaye S., Talaee M.R. Thermal-economic analysis of a heat pipe heat exchanger for energy

recovery in air conditioning applications // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. – 2009. – Vol. 223 (8). – P. 925–937. DOI: 10.1243/09576509JPE814.

18. Ramos J., Chong A., Tan C.K., Matthews J., Boocock M., Jouhara H. CFD simulation and analysis of gas to water two phase closed thermosyphon based heat exchanger // *Heat Transfer XIII: Simulation and Experiments in Heat and Mass Transfer / Brebbia C.A., Sundén B. (Eds.)*. – Coruna: WIT Press, 2014. – P. 217–228. (WIT Transactions on Engineering Sciences; Vol. 83).

19. Glavachka V., Kiselev V.G., Matveev Yu.N., Rabetsky M.I., Schtulz P. Unified heat pipe heat exchangers used for heat recovery // *Heat Pipe Technology: Volume 2. Materials and Applications / Vasiliev L.L. (Ed.)*. – Begell House. – ISBN: 0-8493-9922-X.

## REFERENCES

1. Skanavi A.N., Makhov L.M. *Heating: University Textbook*. Moscow: ASV Publishing House, 2008. 576 p.

2. Vasiliev G.P., Timofeev N.A., Burmistrov A.A. Source of secondary energy resources – ventilation emissions of residential apartments. *Energy Saving*. 2010;(4):14-18.

3. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Petrenko D.M. Critical analysis of existing air heat recovery schemes. *Construction and Technogenic Safety*. p.53-57.

4. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Petrenko D.M. Air heat recovery systems: comparative analysis of advantages and disadvantages. In: *Methodology of Living Environment Safety: Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference*. Simferopol, 2025, p.528-532.

5. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Petrenko D.M., Zakharov A.S. Study of thermal efficiency and aerodynamic characteristics of a recuperator with cross-shaped heat pipes using CFD modeling. *Paradigma*. 2026;(3-1):228-238.

6. Zaycev O.N., Angeluck I.P., Petrenko D.M., Zakharov A.S. Numerical modeling of heat transfer and hydrodynamics in an air recuperator based on heat pipes. *Paradigma*. 2026;(2-2):178-185.

7. Zaycev O.N., Angeluck I.P. Feasibility study of using a flue gas heat recovery system. *Construction and Technogenic Safety*. 2019;(16(68)):99-104.

8. Ardzinov V.D., Baranovskaya N.I., Kurochkin A.I. *Cost Estimating in Construction*. St. Petersburg: Piter, 2009. 377 p.

9. Pashentsev A.I., Rotanov G.N., Finogentova A.V., Sitnikova E.N. *Strategic Management of Economic Security*. Simferopol: Diapi, 2019. 274 p.

10. SP 60.13330.2012. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Updated version of SNiP 41-01-2003. Moscow: Analitik, 2012. 81 p.

11. SP 131.13330.2012. *Building Climatology*. Updated version of SNiP 23-01-99. Moscow: TsPP, 2012. 109 p.

12. SP 56.13330.2021. *Industrial Buildings*. Updated version of SNiP 31-03-2001. Moscow: RST, 2021. 67 p.

13. *On the Functioning of Retail Electricity Markets, Full and (or) Partial Restriction of Electricity Consumption Mode*: Decree of the Government of the Russian Federation No. 442 of 04.05.2012 (amended as of 01.01.2026).

14. Faisal Z.A., Eidan A.A., Al-Manea A. Review of the effectiveness of heat pipe heat exchangers for waste heat recovery in HVAC systems. *Engineering Research Express*. 2025;7:032504. DOI: 10.1088/2631-8695/ae05e7

15. Zhang D., Tao W.Q., He Y.L. Review of Recent Applications of Heat Pipe Heat Exchanger Use for Waste Heat Recovery. *Energies*. 2024;17(11):2504. DOI: 10.3390/en17112504

16. Ali S.M., Sarsam W.S. Theoretical and experimental investigation of a heat pipe heat exchanger for energy recovery of exhaust air. *Heat Transfer*. 2022;51(4):3600-3619. DOI: 10.1002/htj.22466

17. Sanaye S., Talaei M.R. Thermal-economic analysis of a heat pipe heat exchanger for energy recovery in air conditioning applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2009;223(8):925-937. DOI: 10.1243/09576509JPE814

18. Ramos J., Chong A., Tan C.K., Matthews J., Boocock M., Jouhara H. CFD simulation and analysis of gas to water two phase closed thermosyphon based heat exchanger. In: Brebbia C.A., Sundén B. (Eds.), *Heat Transfer XIII: Simulation and Experiments in Heat and Mass Transfer*. WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 83. Coruna: WIT Press, 2014, p.217-228.

19. Glavachka V., Kiselev V.G., Matveev Yu.N., Rabetsky M.I., Schtulz P. Unified heat pipe heat exchangers used for heat recovery. In: Vasiliev L.L. (Ed.), *Heat Pipe Technology: Volume 2. Materials and Applications*. Begell House. ISBN: 0-8493-9922-X

TECHNICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF USING RECUPERATORS BASED ON  
CROSS-SHAPED HEAT PIPES IN VENTILATION SYSTEMS OF SMALL INDUSTRIAL  
WORKSHOPS

Petrenko D.M.

Vernadsky Crimean Federal University,  
Institute "Academy of Construction and Architecture"  
181, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea 295050  
E-mail: iliya.angeluck@yandex.ru

**Abstract.** This paper presents a techno-economic assessment of implementing local air heat recovery systems based on cross-shaped heat pipes in small-scale production workshops with elevated dust concentrations. Using the climatic conditions of Simferopol as a case study, a comparative analysis of capital and operating expenditures was conducted for four supply and exhaust ventilation configurations: a gas-fired air heater, an electric air heater, a plate heat recuperator, and the proposed cross-shaped heat pipe unit. The simple and discounted payback periods, as well as the economic efficiency coefficient, were calculated to evaluate the feasibility of the proposed solution.

**Materials and methods:** the study employed materials and methods related to the technical and economic justification for implementing technically complex systems under market conditions in countries with developing economies.

**Results:** the results of the technical and economic assessment were obtained. The simple payback period amounted to 0,76 years, the discounted payback period was 0,87 years, and the economic efficiency coefficient was 1,308.

**Conclusions:** the technical and economic feasibility study confirmed the viability of implementing recuperators based on cross-shaped heat pipes. The economic benefit is achieved through reduced consumption of traditional energy sources and minimized maintenance costs. The design features of cross-shaped heat pipes (physical separation of flows, resistance to dust deposits, low hydraulic resistance) ensure the stability of technical and economic indicators throughout the entire lifecycle of the installation.

**Key words:** heat recovery, cross-shaped heat pipes, payback period, energy efficiency, techno-economic assessment, small-scale industrial ventilation