

Научная статья
УДК 338.5

Экономическая оценка целесообразности применения рекуперативного теплообменного аппарата в промышленных условиях

Вадим Эдуардович Зинуров¹, Гузель Рамилевна Бадретдинова²,
Резеда Исхаковна Гильмутдинова³, Олеся Станиславовна Чернова⁴

^{1,2,3,4} Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

¹ vadd_93@mail.ru

² nice.badretdinova@mail.ru

³ gilmutdinovarezeda@mail.ru

⁴ olesya.2805@mail.ru

Аннотация. В современных условиях промышленного производства ключевым аспектом является повышение энергоэффективности и оптимизация использования ресурсов. Эти меры необходимы для обеспечения экономической рентабельности промышленных предприятий. Авторами данного исследования разработана конструкция рекуперативного теплообменного аппарата для передачи тепловой энергии от парогазовых выбросов к холодной воде, используемой для технологических и хозяйственных нужд. Целью работы является проведение экономической оценки целесообразности применения рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси на промышленном предприятии. Для оценки рентабельности применения теплообменного аппарата в различных эксплуатационных условиях рассчитаны чистая приведенная стоимость NPV, дисконтированный период окупаемости DPP и индекс доходности PI. В ходе расчетов учитывалось влияние технического состояния оборудования и частоты его обслуживания на экономические показатели проекта. Исследование основывалось на расчетах различных сценариев работы теплообменника с учетом загрязнения теплопередающей поверхности и изменения передаваемого теплового потока Q_b между теплоносителями. В ходе исследования варьировались тепловой поток Q_b от 50 до 200 кВт и начальные инвестиции в проект от 3500 до 6500 тыс. руб. В результате были получены данные, демонстрирующие, как изменение этих параметров влияет на чистую приведенную стоимость проекта и сроки его окупаемости. Основные выводы подчеркивают необходимость регулярной очистки и обслуживания теплообменника для поддержания его эффективности и ускорения окупаемости инвестиций. Получено, что при ставке дисконтирования 16% проект будет экономически рентабельным, если начальные инвестиции не превышают 5107 тыс. руб. Дисконтированный срок окупаемости проекта DPP составляет в среднем от 1,5 до 3,4 года.

Ключевые слова: экономическая оценка, теплообменный аппарат, чистая приведенная стоимость, дисконтированный период окупаемости, индекс доходности, инвестиции, экономическое обоснование, инновационный проект

Основные положения:

- ♦ осуществлена экономическая оценка внедрения конструкции рекуперативного теплообменного аппарата на промышленном предприятии для эффективной передачи тепловой энергии от парогазовых выбросов к холодной воде, используемой для технологических и хозяйственных нужд;
- ♦ проведен анализ влияния технического состояния теплообменного аппарата и частоты его обслуживания на такие экономические показатели проекта, как чистая приведенная стоимость (NPV), дисконтированный период окупаемости (DPP) и индекс доходности (PI);

♦ рассмотрено влияние первоначальной стоимости проекта по внедрению теплообменного аппарата на промышленном предприятии IC от 3500 до 6500 тыс. руб. и снижения теплового потока Q_b от 200 до 50 кВт на изменение чистой приведенной стоимости, дисконтированного периода окупаемости и индекса доходности проекта.

Благодарности: работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>

Для цитирования: Экономическая оценка целесообразности применения рекуперативного теплообменного аппарата в промышленных условиях / В.Э. Зинуров, Г.Р. Бадретдинова, Р.И. Гильмутдинова, О.С. Чернова // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2024. № 12 (242). С. 30–41.

Original article

Economic assessment of the feasibility of using a recuperative heat exchanger in industrial conditions

Vadim E. Zinurov¹, Guzel R. Badretdinova², Rezeda I. Gilmutdinova³, Olesya S. Chernova⁴

^{1,2,3,4} Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

¹ vadd_93@mail.ru

² nice.badretdinova@mail.ru

³ gilmutdinovarezeda@mail.ru

⁴ olesya.2805@mail.ru

Abstract. In modern conditions of industrial production, the key aspect is to increase energy efficiency and optimize the use of resources. These measures are necessary to ensure the economic profitability of industrial enterprises. The authors of this study have developed a design of a regenerative heat exchanger for the transfer of thermal energy from steam and gas emissions to cold water used for technological and economic needs. The purpose of the work is to carry out an economic assessment of the feasibility of using a regenerative heat exchanger with a ribbed surface in conditions of contamination during condensation of a vapor-gas mixture at an industrial enterprise. To assess the profitability of using a heat exchanger in various operating conditions, the net present value (NPV), the discounted payback period (DPP) and the profitability index (PI) are calculated. The calculations took into account the impact of the technical condition of the equipment and the frequency of its maintenance on the economic performance of the project. The study was based on calculations of various scenarios of the heat exchanger operation, taking into account contamination of the heat transfer surface and changes in the transmitted heat flow Q_b between the heat carriers. During the study, the Q_b heat flow varied from 50 to 200 kW and the initial investment in the project varied from 3,500 to 6,500 thousand rubles. As a result, data were obtained demonstrating how changes in these parameters affect the net present value of the project and its payback period. The main findings emphasize the need for regular cleaning and maintenance of the heat exchanger to maintain its efficiency and accelerate the return on investment. It was found that at a discount rate of 16%, the project will be economically profitable if the initial investment does not exceed 5,107 thousand rubles. The discounted payback period (DPP) of the project is on average from 1.5 to 3.4 years.

Keywords: economic assessment, heat exchanger, net present value, discounted payback period, profitability index, investments, economic justification, innovative project

Highlights:

♦ the economic assessment was conducted on the implementation of a recuperative heat exchanger design at an industrial facility for the effective transfer of thermal energy from flue gases to cold water used for technological and utility needs;

- ◆ the analysis of the influence of the technical condition of the heat exchanger and the frequency of its maintenance on such economic indicators of the project as net present value (NPV), discounted payback period (DPP) and profitability index (PI) is carried out;
- ◆ the influence of the initial cost of the project for implementing a heat exchanger at an industrial facility, ranging from 3500 to 6500 thousand rubles, and the decrease in heat flow Q_b from 200 to 50 kW on changes in the net present value, discounted payback period, and profitability index of the project was examined.

Acknowledgments: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>

For citation: Economic assessment of the feasibility of using a recuperative heat exchanger in industrial conditions / V.E. Zinurov, G.R. Badretdinova, R.I. Gilmutdinova, O.S. Chernova // Vestnik of Samara State University of Economics. 2024. No. 12 (242). Pp. 30–41. (In Russ.).

Введение

В условиях постоянно возрастающих требований к эффективности производственных процессов внедрение экономически выгодных технологических решений становится ключевой задачей для предприятий различных отраслей [1]. Одним из наиболее значимых направлений оптимизации является модернизация оборудования, в частности внедрение новых теплообменных аппаратов в технологическую линию. Эффективность такого внедрения оценивается не только с точки зрения технических характеристик нового оборудования, но и с позиции экономической целесообразности, включающей анализ начальных инвестиций, эксплуатационных затрат и потенциального экономического эффекта.

Теплообменные аппараты играют важную роль в повышении энергоэффективности производственных процессов, особенно в теплогенерирующих установках. Экономический анализ, представленный в исследованиях [2; 3], подтверждает значительное снижение затрат на энергию при использовании современных теплообменных систем, которые, как показано, могут увеличить коэффициент полезного действия до 93% и снизить стоимость системы на 23,1%. В статье [4] представлен экономический расчет, направленный на целесообразность использования пластинчатого теплообменного аппарата вместо кожухотрубного на теплоэлектроцентрали, а также рассмотрены достоинства и недостатки данных аппаратов.

Однако ряд негативных факторов, в частности загрязнение теплопередающих поверхностей, может значительно снижать эффек-

тивность теплообменников, что приводит к увеличению операционных расходов. Ввиду этого необходимо применять комплексный подход при экономическом анализе внедрения теплообменных аппаратов. Такой подход должен включать в себя не только анализ потенциальных преимуществ, но и оценку возможных рисков, связанных с эксплуатацией оборудования.

Критический анализ всех аспектов внедрения, включая техническое состояние оборудования, частоту и сложность необходимого технического обслуживания, а также потенциальное ухудшение показателей работы теплообменных аппаратов, является обязательным. Это позволяет не только адекватно оценить экономическую целесообразность проектов, но и спланировать меры по оптимизации эксплуатационной деятельности и минимизации негативного воздействия на производственный процесс.

Авторами настоящей работы спроектирован и исследован рекуперативный теплообменный аппарат, который был внедрен на промышленном предприятии (рис. 1). Данный аппарат осуществлял передачу тепловой энергии от парогазовой смеси, представляющей собой высокотемпературные отходящие газы производственного процесса температурой около 220 °С, к холодному теплоносителю – воде, которая использовалась для технологических и хозяйственных нужд предприятия. Используемая оребренная конструкция значительно интенсифицировала передачу теплового потока за счет возникновения турбулентных завихрений, что увеличивало эффективность теплооб-



Рис. 1. Рекуперативный теплообменный аппарат на промышленном предприятии



Рис. 2. Загрязнение оребренной поверхности труб в рекуперативном теплообменном аппарате в ходе его эксплуатации на промышленном предприятии

мена между парогазовой смесью и нагреваемым теплоносителем [5–7].

Одной из существенных проблем использования теплообменного аппарата на данном промышленном предприятии в условиях конденсации парогазовой смеси стало осаждение частиц целлюлозы на теплопередающую поверхность (рис. 2). Это приводит к ухудшению эффективности работы аппарата, так как нарастающий слой осадка снижает теплопроводность и обуславливает увеличение тепло-

вого сопротивления системы. В результате проведенных исследований было выявлено, что осаждение целлюлозных частиц ведет к необходимости частого технического обслуживания теплообменника, включая очистку поверхности для поддержания оптимального уровня теплопередачи и предотвращения снижения производительности.

Стоит отметить, что проблема осаждения частиц, таких как целлюлоза, на теплопередающих поверхностях теплообменников явля-

ется широко распространенной в промышленности [8–10]. Данная проблема актуальна для различных промышленных секторов, включая химический, бумажный, энергетический и др., где теплообменники используются для передачи тепловой энергии от парогазовых смесей [11–13]. В связи с этим анализ представленной проблемы при экономической оценке внедрения теплообменных аппаратов на промышленных предприятиях выступает актуальной задачей.

Целью исследования является проведение экономической оценки целесообразности применения рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси на промышленном предприятии. Особое внимание уделяется анализу влияния частоты и сложности технического обслуживания теплообменного аппарата на общую экономическую эффективность и надежность его работы.

Методы

Для оценки экономической выгоды от внедрения рекуперативного теплообменника на производственном объекте были применены широко используемые методы: приведение денежных потоков к текущей стоимости, расчет периода окупаемости инвестиций, анализ рентабельности и чистой приведенной стоимости. Эти методы основываются на анализе инвестиционных затрат в проект и прогнозировании доходов от его реализации.

Для прогнозирования текущей стоимости будущих финансовых потоков, связанных с внедрением рекуперативного теплообменного аппарата, использовался коэффициент дисконтирования K_d , рассчитываемый по формуле (1). Данный показатель вычисляется с учетом ставки дисконтирования r и временного интервала t , на протяжении которого реализуется проект. Ставка дисконтирования r , принятая в данном исследовании, составляет 0,16 с учетом рыночных процентных ставок, рисков проекта и других факторов:

$$K_d = \frac{1}{(1+r)^t}. \quad (1)$$

Для оценки экономической эффективности инвестиций в проект по внедрению тепло-

обменного аппарата применялся метод дисконтирования денежных потоков DCF. Этот метод позволяет оценить будущие финансовые потоки, приведенные к текущему моменту времени, и рассчитывается на основе ежегодных финансовых поступлений, включая амортизационные отчисления. Дисконтированные денежные потоки рассчитывались по формуле (2):

$$DCF = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (2)$$

где CF_t – годовые финансовые потоки, которые включают амортизационные отчисления, тыс. руб.

Чистая приведенная стоимость NPV является наиболее информативным параметром для анализа финансовой выгоды, связанной с внедрением теплообменного аппарата на промышленном предприятии, и рассчитывается по формуле (3):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - |IC|, \quad (3)$$

где IC – начальные инвестиции в проект по внедрению теплообменного аппарата на промышленном предприятии, тыс. руб.

Индекс доходности PI является ключевым показателем для оценки прибыльности проекта. Он вычисляется как отношение чистой текущей стоимости доходов к первоначальным инвестициям согласно формуле (4). Значение PI, равное или превышающее 1, указывает на то, что проект является экономически целесообразным и приносит прибыль:

$$PI = \frac{NPV}{IC} + 1. \quad (4)$$

Дисконтированный срок окупаемости DPP определяет период, необходимый для того, чтобы совокупность приведенных к текущей стоимости денежных потоков полностью возместила первоначальные инвестиции в проект. Этот показатель важен для оценки временных рамок возврата вложений в проект. Данный параметр вычислялся по формуле (5):

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq IC. \quad (5)$$

Оценочную стоимость внедрения рекуперативного теплообменного аппарата на промышленном предприятии можно рассчитать по формуле (6):

$$K = K_{\text{мат}} + K_{\text{н}} + K_{\text{пр}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{мат}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{пр}}$ – материальные затраты, накладные затраты, дополнительные расходы, руб.

Материальные затраты включают все расходы, связанные с приобретением сырья и материалов (стоимость металлов, изоляционных материалов, компонентов и др.), необходимых для сборки и эксплуатации теплообменного аппарата.

Стоит отметить, что данные расходы также охватывают закупку стандартных и специализированных деталей. К накладным расходам K_n относят затраты на управление проектом, зарплаты административного и управленческого персонала и др. Прочие расходы $K_{пр}$ представляют собой затраты, которые не входят непосредственно в категории материальных или накладных расходов.

Для данного исследования ориентировочная стоимость проекта была определена в размере 3,5 млн руб. Это значение было использовано на основе расчетов при создании и внедрении теплообменного аппарата (см. рис. 1). В связи с быстро меняющейся экономической ситуацией и динамикой цен на материалы в исследовании были также рассмотрены альтернативные сценарии с возможной стоимостью внедрения теплообменного аппарата в размере 4,5, 5,5 и 6,5 млн руб. Эти сценарии позволяют адаптировать экономическую модель проекта к изменениям рыночной конъюнктуры. Таким образом, начальные инвестиции (IC) в проект по внедрению теплообменного аппарата на промышленном предприятии были определены на уровнях 3500, 4500, 5500 и 6500 тыс. руб.

Финансовые потоки в год CF от эксплуатации теплообменного аппарата на предприятии рассчитываются исходя из разницы между экономией средств, ранее затрачиваемых на обогрев воды, и затратами на обслуживание данного аппарата. В процессе эксплуатации теплообменника происходит конденсация парогазовой смеси на его оребренной поверхности, что ведет к осаждению частиц целлюлозы. С течением времени эти отложения формируют наросты, которые ухудшают теплообмен между парогазовой смесью и нагреваемой водой, снижая теплопередачу.

Снижение теплового потока, поступающего от парогазовой смеси к воде, делает необходимым периодическое удаление наростов с помощью промывки поверхностей водой для

восстановления оптимальных рабочих характеристик теплообменника.

Сэкономленная электроэнергия, полученная вследствие работы предлагаемого теплообменника, может быть рассчитана по выражению (7):

$$P_Q = Q_1 n_T P_1, \quad (7)$$

где Q_1 – количество тепла, которое передается в течение одного цикла между двумя теплоносителями, Дж; n_T – число рабочих циклов в течение года, шт.; P_1 – цена 1 Дж энергии, руб./Дж.

Денежные затраты на потребление воды для восстановления теплопередающей поверхности теплообменника вычисляются по формуле (8):

$$P_V = V_1 n_T P_{V1}, \quad (8)$$

где V_1 – объем воды, который необходимо затратить для одного процесса восстановления теплопередающей поверхности, м³; P_{V1} – цена за 1 м³ воды, руб./м³.

В предыдущих исследованиях [14] были выведены уравнения для расчета теплового потока Q_1 за один цикл (9) и определения времени работы до следующей очистки теплообменной поверхности τ_p (10):

$$Q_1 = \frac{Q_b}{B} (1 - \exp(-B\tau_p)), \quad (9)$$

где Q_b – необходимый тепловой поток, передаваемый от одного теплоносителя к другому, Дж; B – параметр, который зависит от характеристик горячего теплоносителя, 1/с ($B = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ 1/с}$);

$$\tau_p = -\frac{1}{B} \ln \left(1 - \frac{P_{V1} V_1 B}{P_1 Q_b} \right). \quad (10)$$

Анализ формул (7)–(10) позволяет вывести выражение (11) для расчета годовых финансовых потоков CF (руб.) от эксплуатации теплообменного аппарата на промышленном предприятии, учитывая дополнительные расходы, включающие обслуживание автоматизированных устройств для подачи воды на ребристую поверхность теплообменного аппарата, закупку поверхностно-активных веществ для эффективного очищения и налоговые отчисления за утилизацию загрязненной воды после промывки аппарата:

$$CF = -\frac{4,7 P_{V1} V_1}{\ln \left(1 - \frac{P_{V1} V_1 B}{P_1 Q_b} \right)}. \quad (11)$$

Теплообменный аппарат (см. рис. 1) проектировался таким образом, чтобы значение

теплового потока Q_b составляло 200 кВт. Однако данное значение представляет собой идеальную рабочую мощность устройства в условиях, при которых теплообменная поверхность аппарата находится в чистом состоянии, что обеспечивает максимальную эффективность передачи тепла.

В процессе эксплуатации из-за возможных различных факторов эффективность может снижаться, поэтому для оценки экономической эффективности и рисков проекта в расчетах использовались также пониженные значения теплового потока: 150, 100 и 50 кВт. Это позволило моделировать различные сценарии работы теплообменника и анализировать его окупаемость в менее идеальных условиях.

Для проведения анализа рентабельности использовалась стоимость использования воды $P_{V1} = 100$ руб./м³, $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж было выбрано в качестве стандартной стоимости единицы энергии исходя из текущих тарифов на энергоносители.

Объем воды для одного процесса очистки $V_1 = 1$ м³ был определен на основе ранее проведенных технических расчетов, необходимых для эффективной промывки и удаления осадков с поверхности аппарата. Полезный срок использования теплообменного аппарата N составляет 10 лет.

Результаты

Результаты расчетов показали, что проект по внедрению теплообменного аппарата на промышленном предприятии с целью отбора тепловой энергии от парогазовых выбросов и ее передачи холодной воде, используемой для хозяйственных и технологических нужд, с экономической точки зрения является выгодным. NPV при значениях теплового потока $Q_b \geq 100$ кВт становится положительной на 1–3-й год эксплуатации теплообменного аппарата на предприятии. При несоблюдении эксплуатационных правил тепловой поток Q_b будет уменьшаться, что приведет к более длительной окупаемости проекта. Так, при $Q_b = 50$ кВт NPV проекта становится положительной на 8-й год (рис. 3). Это объясняется тем, что при максимальном тепловом потоке Q_b достигаются высокие значения финансовых потоков CF, зарабатываемых предприятием путем экономии денежных средств, затрачиваемых на оплату электроэнергии для нагрева воды, способствующие быстрой окупаемости проекта.

С другой стороны, необходимые начальные инвестиции IC для реализации проекта также оказывают значимое влияние на его окупаемость. По рис. 4 видно, что NPV проекта соответствует 0 тыс. руб. на 1,21, 1,82, 2,18 и 2,85 года при начальной инвестиции IC 3500,

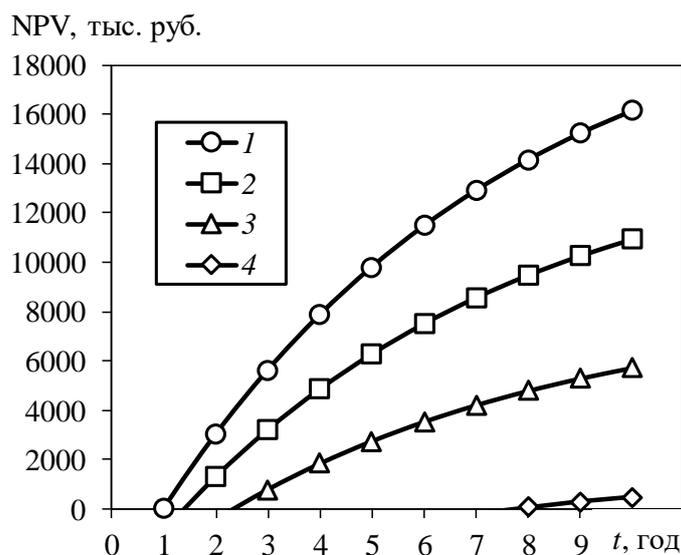


Рис. 3. Зависимость чистой приведенной стоимости по годам от внедрения теплообменного аппарата на предприятии при различных значениях теплового потока Q_b , кВт: 1 – 200; 2 – 150; 3 – 100; 4 – 50

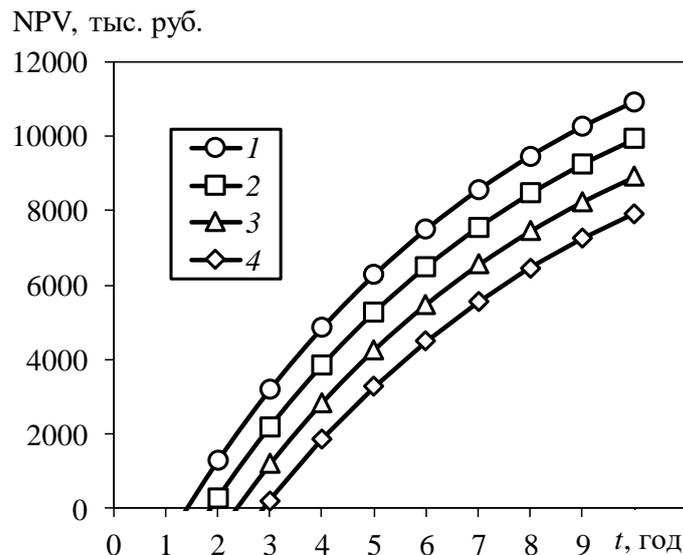


Рис. 4. Зависимость чистой приведенной стоимости по годам от внедрения теплообменного аппарата на предприятии при различных значениях начальных инвестиций в проект IC, тыс. руб.: 1 – 3500; 2 – 4500; 3 – 5500; 4 – 6500

Примечание – Тепловой поток $Q_b = 150$ кВт.

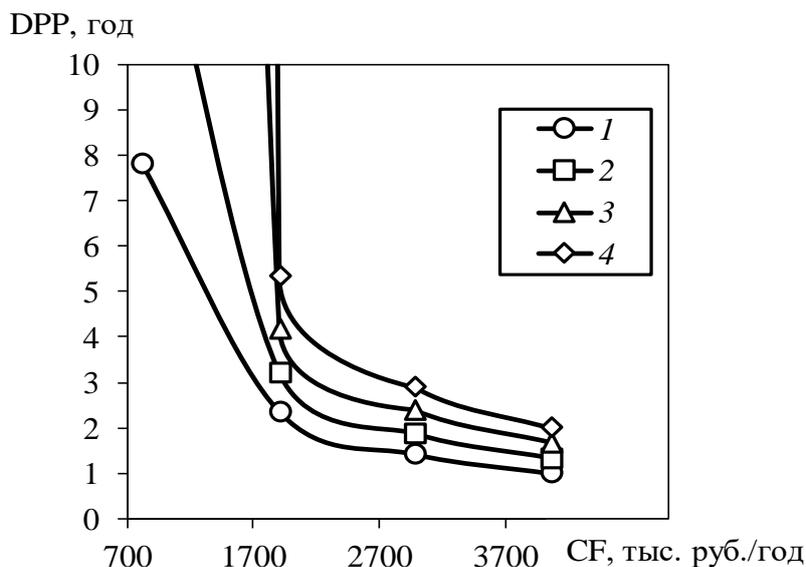


Рис. 5. Зависимость дисконтированного периода окупаемости от финансовых потоков с учетом амортизационных отчислений при различных значениях начальных инвестиций в проект IC, тыс. руб.: 1 – 3500; 2 – 4500; 3 – 5500; 4 – 6500

4500, 5500 и 6500 тыс. руб. соответственно. Анализ зависимостей дисконтированного периода окупаемости проекта DPP (рис. 5) и индекса доходности PI (рис. 6) показал, что при значениях финансовых потоков CF (тыс. руб./год), равных 817,17 (значение, полученное при $Q_b = 50$ кВт), проект является экономиче-

ски нерентабельным при $IC \geq 4500$ тыс. руб. Стоит отметить, что при $IC = 4500$ тыс. руб. окупаемость проекта составляет более 10 лет, что превышает эксплуатационный срок службы теплообменного аппарата.

При значениях IC, равных 5500 и 6500 тыс. руб., проект не окупится. Расчет сто-

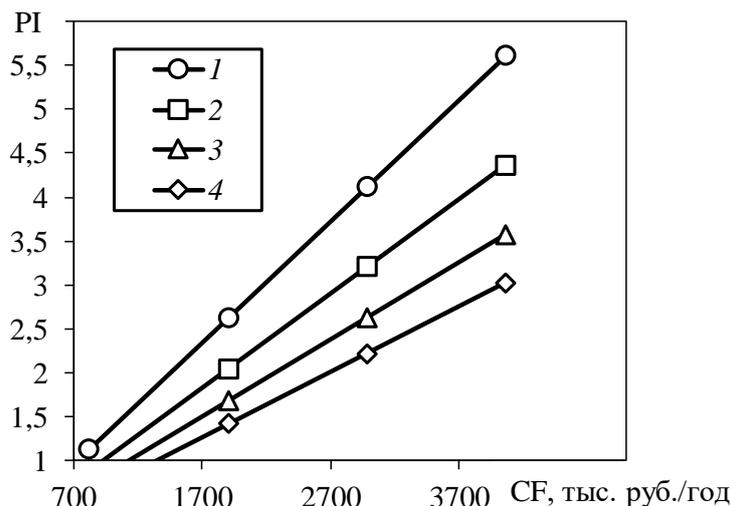


Рис. 6. Зависимость индекса доходности по годам от финансовых потоков с учетом амортизационных отчислений при различных значениях начальных инвестиций в проект IC, тыс. руб.: 1 – 3500; 2 – 4500; 3 – 5500; 4 – 6500

имости бессрочного аннуитета PV производится по выражению (12):

$$PV = \frac{CF}{r}. \quad (12).$$

Он показывает, что проект будет выгоден, если начальные инвестиции не превышают 5107 тыс. руб. ($r = 0,16$).

Обсуждение

NPV проекта по внедрению теплообменного аппарата на промышленном предприятии на протяжении его установленного полезного использования в течение 10 лет при начальных инвестициях в проект IC = 3500 тыс. руб. составляет от -3500 тыс. руб. до 16138, 10930, 5712 и 449 тыс. руб. при значении теплового потока Q_b , равном 200, 150, 100 и 50 кВт соответственно. При этом NPV проекта возрастает до положительных значений на 1–3-й и 8-й год при значении теплового потока Q_b , равном 200, 150, 100 и 50 кВт соответственно (см. рис. 3).

Начальные инвестиции в проект IC = 3500 тыс. руб. В случае увеличения начальных инвестиций в проект IC чистая приведенная стоимость NPV уменьшается в среднем на 19% при значении теплового потока Q_b 150 кВт. При этом NPV проекта изменяется от -3500 до 10930, 9930, 8930 и 7930 тыс. руб. при начальных инвестициях в проект IC, составляющих 3500, 4500, 5500 и 6500 тыс. руб. соответственно (см. рис. 4).

Дисконтированный период окупаемости проекта DPP уменьшается по мере увеличения финансовых потоков CF и снижения требуемых начальных инвестиций в проект IC (см. рис. 5). Получено, что дисконтированный период окупаемости проекта в среднем составляет 1,5, 2,1, 2,7 и 3,4 года при финансовых потоках CF, получаемых предприятием от эксплуатации внедренного теплообменного аппарата, от 1906 до 4063 тыс. руб./год при начальных инвестициях IC, составляющих 3500, 4500, 5500 и 6500 тыс. руб. соответственно. По мере увеличения финансовых потоков CF разница между значениями дисконтированного периода окупаемости DPP для различных значений начальных инвестиций в проект IC уменьшается. Так, при CF = 1906 тыс. руб. дисконтированный период окупаемости DPP изменяется от 2,36 (IC = 3500 тыс. руб.) до 5,33 года (IC = 6500 тыс. руб.), при CF = 4063 тыс. руб. дисконтированный период окупаемости DPP увеличивается от 1 (IC = 3500 тыс. руб.) до 1,99 года (IC = 6500 тыс. руб.).

Как отмечалось выше, проект является экономически рентабельным при условии, если его индекс доходности PI больше или равен 1. Получено, что PI = 1 при значении финансовых потоков CF (тыс. руб./год), равном 715 (IC = 3500 тыс. руб.), 909 (IC = 4500 тыс. руб.), 1111 (IC = 5500 тыс. руб.) и 1429 (IC = 6500 тыс. руб.). При этом индекс доходности PI

изменяется в диапазоне 1,1–5,6, 0,8–4,3, 0,7–3,5 и 0,6–3,1 при начальных инвестициях в проект IC (тыс. руб.), составляющих 3500, 4500, 5500 и 6500 тыс. руб. соответственно (см. рис. 6).

Заключение

Ключевым фактором, определяющим успех внедрения теплообменного аппарата, является систематическое соблюдение эксплуатационных требований, включая регулярное техническое обслуживание и очистку от загрязнений. Это обеспечивает высокую эффективность теплообменного аппарата и предотвращает снижение теплового потока, что напрямую влияет на экономическую выгоду от его использования. Пренебрежение данными процедурами может привести к значительному увеличению периода окупаемости проекта и снижению общей рентабельности инвестиций.

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Периодическая очистка теплообменной поверхности значительно повышает экономическую эффективность теплообменника, умень-

шая время достижения положительной чистой приведенной стоимости NPV и сокращая риски, связанные с потерей тепловой мощности из-за загрязнений. При Q_b , равной 200, 150, 100 и 50 кВт, финансовые потоки CF составляют 817, 1906, 2985 и 4063 тыс. руб. в год соответственно.

2. Чистая приведенная стоимость проекта NPV изменяется от -3500 до 10930, 9930, 8930 и 7930 тыс. руб. при начальных инвестициях в проект IC, составляющих 3500, 4500, 5500 и 6500 тыс. руб. соответственно при тепловом потоке $Q_b = 150$ кВт.

3. При ставке дисконтирования $r = 0,16$ проект будет экономически рентабельным, если начальные инвестиции не превышают 5107 тыс. руб.

4. Дисконтированный срок окупаемости проекта DPP составляет в среднем от 1,5 до 3,4 года.

5. Индекс доходности проекта PI составляет не менее 1 при значении финансовых потоков CF (тыс. руб./год), равном 715 (IC = 3500 тыс. руб.), 909 (IC = 4500 тыс. руб.), 1111 (IC = 5500 тыс. руб.) и 1429 (IC = 6500 тыс. руб.).

Список источников

1. Зинуров В.Э., Галимова А.Р. Оценка экономической эффективности внедрения сепарационных устройств на предприятиях с покрасочными камерами // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2020. № 12 (194). С. 50–59. doi:10.46554/1993-0453-2020-12-194-50-59.
2. Сотникова О.А., Петрикеева Н.А. Расчет экономической эффективности применения конденсационных теплообменных устройств теплогенерирующих установок // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 1 (9). С. 113–117.
3. Feasibility study of a novel hybrid energy system combining photovoltaic-thermal and modular ground heat exchanger / S. Bae, Y. Nam, E.-J. Lee, E. Entchev // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 61.
4. Фоминых К.С. Экономическая эффективность замены кожухотрубного теплообменного аппарата на пластинчатый теплообменный аппарат на ТЭЦ-2 г. Йошкар-Ола // Academy. 2019. № 2 (41). С. 20–22.
5. Экспериментальное исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность / В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, И.И. Шарипов, А.Р. Галимова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Т. 7, № 2 (26). С. 60–74. doi:10.21684/2411-7978-2021-7-2-60-74.
6. Исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность / В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, Г.Р. Бадретдинова, И.В. Санников // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения) : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Иваново, 2–4 июня 2021 г. / Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И. Ленина. Иваново, 2021. С. 241–243.
7. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Г.Р. Бадретдинова, И.Р. Калимуллин, В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетика. 2023. Т. 25, № 2. С. 176–186. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.

8. Bell I.H., Groll E.A. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, No. 5. Pp. 742–749.
9. Wallhäußer E., Hussein M.A., Becker T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry // *Food Control*. 2012. Vol. 27, No. 1. Pp. 1–10.
10. Karlovich T.B. Heat transfer of circular finned tubes with nonuniform operational fouling of the interfin space // *Journal of Engineering Physics and Thermo-physics*. 2018. Vol. 91, No. 5. Pp. 1211–1219.
11. Davoudi E., Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 130. Pp. 138–153.
12. Hosseini S.B., Khoshkhoo R.H., Malabad S.M.J. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 115. Pp. 406–417.
13. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger / P.O. Kapustenko, J.J. Klemeš, O.I. Matsegora [et al.] // *Energy*. 2019. Vol. 174. Pp. 1049–1059.
14. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси / А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова, А.Н. Николаев // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2022. Т. 24, № 1. С. 176–185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

References

1. Zinurov V.E., Galimova A.R. Assessment of the economic efficiency of the introduction of separation devices at enterprises with paint chambers // *Vestnik of Samara State University of Economics*. 2020. No. 12 (194). Pp. 50–59. doi:10.46554/1993-0453-2020-12-194-50-59.
2. Sotnikova O.A., Petrikeeva N.A. Calculation of the economic efficiency of the use of condensing heat exchange devices of heat generating plants // *Scientific Bulletin of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and architecture*. 2008. No. 1 (9). Pp. 113–117.
3. Feasibility study of a novel hybrid energy system combining photovoltaic-thermal and modular ground heat exchanger / S. Bae, Y. Nam, E.-J. Lee, E. Entchev // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 61.
4. Fominykh K.S. Economic efficiency of replacing a shell-and-tube heat exchanger with a plate heat exchanger at CHPP-2 in Yoshkar-Ola // *Academy*. 2019. No. 2 (41). Pp. 20–22.
5. Experimental study of heat transfer from a vapor-gas mixture during heat transfer through a ribbed surface / V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev, I.I. Sharipov, A.R. Galimova // *Bulletin of the Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*. 2021. Vol. 7, No. 2 (26). Pp. 60–74. doi:10.21684/2411-7978-2021-7-2-60-74.
6. Investigation of heat transfer from a vapor-gas mixture during heat transfer through a ribbed surface / V.E. Zinurov, A.R. Galimova, G.R. Badretdinova, I.V. Sannikov // *The state and prospects of development of electrical and thermal technology (XXI Benardos readings) : proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Ivanovo, June 2–4, 2021 / Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. Ivanovo, 2021*. Pp. 241–243.
7. Evaluation of turbulence models in the external flow of a heated pipe / G.R. Badretdinova, I.R. Kalimullin, V.E. Zinurov, A.V. Dmitriev // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2023. Vol. 25, No. 2. Pp. 176–186. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.
8. Bell I.H., Groll E.A. Air-side particulate fouling of microchannel heat exchangers: experimental comparison of air-side pressure drop and heat transfer with plate-fin heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31, No. 5. Pp. 742–749.
9. Wallhäußer E., Hussein M.A., Becker T. Detection methods of fouling in heat exchangers in the food industry // *Food Control*. 2012. Vol. 27, No. 1. Pp. 1–10.
10. Karlovich T.B. Heat transfer of circular finned tubes with nonuniform operational fouling of the interfin space // *Journal of Engineering Physics and Thermo-physics*. 2018. Vol. 91, No. 5. Pp. 1211–1219.
11. Davoudi E., Vaferi B. Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. Vol. 130. Pp. 138–153.
12. Hosseini S.B., Khoshkhoo R.H., Malabad S.M.J. Experimental and numerical investigation on particle deposition in a compact heat exchanger // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 115. Pp. 406–417.
13. Accounting for local thermal and hydraulic parameters of water fouling development in plate heat exchanger / P.O. Kapustenko, J.J. Klemeš, O.I. Matsegora [et al.] // *Energy*. 2019. Vol. 174. Pp. 1049–1059.

14. Restoration of the heat exchange surface in conditions of its contamination during condensation of a vapor-gas mixture / A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, S.D. Borisova, A.N. Nikolaev // News of higher educational institutions. Energy problems. 2022. Vol. 24, No. 1. Pp. 176–185. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

Информация об авторах

В.Э. Зинуров – кандидат технических наук, и.о. зав. кафедрой «Инженерная графика» Казанского государственного энергетического университета;

Г.Р. Бадретдинова – ассистент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Казанского государственного энергетического университета;

Р.И. Гильмутдинова – студент Казанского государственного энергетического университета;

О.С. Чернова – магистрант Казанского государственного энергетического университета.

Information about the authors

V.E. Zinurov – Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Department of Engineering Graphics of the Kazan State Power Engineering University;

G.R. Badretdinova – assistant of the Department of Automation of Technological Processes and Productions of the Kazan State Power Engineering University;

R.I. Gilmutdinova – student of the Kazan State Power Engineering University;

O.S. Chernova – undergraduate student of the Kazan State Power Engineering University.

Статья поступила в редакцию 19.08.2024; одобрена после рецензирования 27.08.2024; принята к публикации 11.11.2024.

The article was submitted 19.08.2024; approved after reviewing 27.08.2024; accepted for publication 11.11.2024.