

УДК 66.011

*А. С. Андреев, Н. Н. Сеницын*  
*Череповецкий государственный университет*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье на основе эксергетического анализа и экономической оценки инвестиций проведена разработка математической модели для оперативного прогнозирования модернизации теплофикационных систем за счет включения в них энерго-сберегающих элементов – тепловых насосов. В основу моделирования заложена концепция формализованного теплового двигателя и использование обобщенного показателя экономической эффективности инвестиционных проектов – чистой дисконтированной стоимости.

Теплофикационные системы, сбережение энергии, термодинамическая эффективность, тепловые насосы, формализованный тепловой двигатель, определяющие параметры, экономия топлива, инвестиции, чистая приведенная стоимость, экономическая эффективность реконструкции.

On the basis of exergic analysis and economic evaluation of investments a mathematical model for operational forecasting of heating systems upgrade by integrating them into energy- conservation elements – heat pumps was developed. The modeling is based on the concept of a formalized heat engine and the use of a composite index of economic efficiency of investment projects – the net present value.

Cogeneration system, energy conservation, thermodynamic efficiency, heat pumps, formalized heat engine, key parameters, fuel economy, investment, net present value, cost-effectiveness of reconstruction.

### Введение.

В традиционных системах теплофикации потребляемая тепловая энергия в конечном итоге необратимо рассеивается в окружающей среде. Эксергия (работоспособность) тепловой энергии в подобных системах не используется и полностью теряется. При этом уровень сбережения коммерческой тепловой энергии в основном определяется качеством теплоизоляции технологических элементов системы. Вместе с тем существенного сбережения тепловой энергии можно достигнуть за счет повышения эксергетической эффективности используемых в системе тепловых двигателей.

При моделировании предполагается решенной проблема качества теплоизоляции теплопередающих трасс, отапливаемых зданий и сооружений. Поэтому в статье речь идет о включении в системы отопления энергосберегающих тепловых двигателей (тепловых насосов), способных осуществлять возврат в процессы теплофикации части рассеянного тепла окружающей среды.

### Основная часть.

Концепция формализованного теплового двигателя предполагает при моделировании сведение исследуемой системы теплофикации к формализованной термодинамической системе, которая описывается минимальным количеством определяющих параметров, учитывающих наличие и степень необра-

тимости энергетических взаимодействий в реальных тепловых двигателях.

Любая необратимость всегда связана с потерями эксергии. Поэтому в качестве обобщающей единицы измерения энергетических потерь, связанных с необратимостью, целесообразно принять эксергию тепла [1], [2]. При этом стоимость эксергии можно выражать коммерческой стоимостью электроэнергии. Количественное выражение для эксергии тепла  $E$  целесообразно представить в виде:

$$E = G_y \cdot q_y \cdot \eta \cdot \eta_p, \quad (1)$$

где:  $G_y$  – расход условного топлива;  $q_y$  – теплотворная способность условного топлива;  $\eta$  – термодинамический КПД преобразования тепла в работу для идеального теплосилового двигателя;  $\eta_p$  – достигнутый в термодинамической системе эксергетический КПД на стадии производства электроэнергии.

Основную долю тепловой энергии, используемой в реальной экономике, традиционно получают путем сжигания добываемого углеводородного топлива. Снижение потерь эксергии тепла в системах теплофикации можно рассматривать как генерацию эксергии  $\Delta E$ , что в соответствии с (1) тождественно экономии топлива.

При использовании тепловых насосов сгенерированная в системе эксергия описывается следующим уравнением:

$$\Delta E = G_y \cdot q_y \cdot \eta \cdot \eta_g \cdot \psi \cdot (\varepsilon - 1), \quad (2)$$

где:  $\psi$  – доля тепловой энергии, потребляемая в тепловых насосах;  $\varepsilon$  – отопительный коэффициент.

Введем в рассмотрение обобщенный показатель *термодинамической эффективности* использования тепловой энергии в теплофикационной системе  $\omega$ .

$$\omega = \eta \cdot \eta_g \cdot \psi \cdot (\varepsilon - 1). \quad (3)$$

Произведение  $G_y \cdot q_y$  представляет собой потребленную в системе тепловую энергию  $Q_T$ . С учетом сказанного модель генерируемой в теплофикационной системе эксергии представляется итоговым уравнением:

$$\Delta E = \omega \cdot Q_T. \quad (4)$$

Модельные уравнения (2)–(4) позволяют оценивать и сравнивать теплофикационные системы по достигнутому в них уровню энергосбережения и экономии топлива. Вместе с тем реализация энергосберегающих систем в условиях рынка может оказаться экономически нецелесообразной, так как при этом необходима разработка и внедрение в теплофикационные системы специальных технических устройств, требующих значительных инвестиций  $I_n$ .

Для того чтобы при планировании энергосбережения объективно обосновать целесообразность и возможность изъятия необходимых денежных средств из других системных источников, необходимо в разработанную термодинамическую модель (2)–(4) включить формализованный показатель экономической эффективности инвестиционных проектов. В качестве такого показателя целесообразно принять чистую дисконтированную стоимость инвестиционного проекта NPV.

При оперативном моделировании период окупаемости проекта в годах можно определить из уравнения:

$$t = \frac{E}{\Delta E}. \quad (5)$$

Ежегодный возврат эксергии в денежном выражении принимается постоянным и определяется выражением (4). В рассмотрение необходимо ввести приведенную стоимость возвратных сумм PV.

$$PV = \int_1^t \frac{\Delta E}{(1+r)^\tau} \cdot d\tau, \quad (6)$$

где:  $r$  – процентная ставка банка, доли.

Максимально допустимые инвестиции  $I_{\max}$  при заданных параметрах определяется из условия положительности моделируемого значения чистой приведенной стоимости:

$$NPV = -I_{\max} + PV > 0. \quad (7)$$

В результате возможность технической модернизации системы теплофикации определяется выполнением следующего экономического условия:

$$I_{\max} \geq I_n, \quad (8)$$

где:  $I_n$  – требуемые инвестиции для технической реализации реконструкции системы, у. е.

Для примера проведено моделирование условной теплофикационной системы с исходными данными, представленными в таблице и при различных процентных ставках  $r$ .

Таблица

Вариант исходных данных для моделирования теплофикационной системы

| $\varepsilon$ | $\psi$ | $\eta \cdot \eta_g$ | E,<br>у. е. | $\Delta E$ ,<br>у. е. | t,<br>лет | $I_{\max}$ ,<br>у. е. |
|---------------|--------|---------------------|-------------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| 2             | 0,3    | 0,33                | 1           | 0,1                   | 10        | 0,52                  |

Зависимость расчетных максимально допустимых инвестиций  $I_{\max}$  от процентной ставки представлена на рисунке.

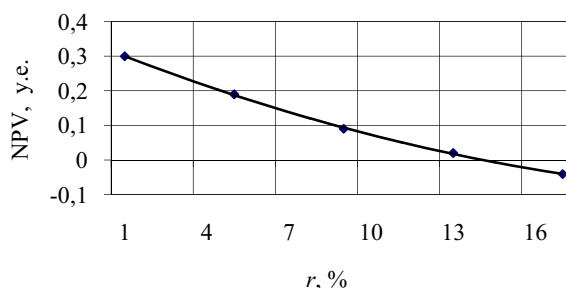


Рисунок. Зависимость приведенной стоимости от процентной ставки

Полученный график позволяет визуально разделить область значений процентных ставок на две зоны. Так, при процентных ставках меньше 14,5 % инвестиционный проект может быть принят. При процентных ставках 14,5 % и более инвестиционный проект должен быть отклонен.

### Выводы.

Разработанная математическая модель в виде системы уравнений (2)–(8) позволяет оперативно прогнозировать возможность модернизации теплофикационных систем за счет включения в них энергосберегающих тепловых насосов.

### Литература

1. Бродянский, В. М. Эксертетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М., 1988.
2. Андреев, А. С. К вопросу выбора эколого-экономического показателя эффективности энергопотребляющих систем / А. С. Андреев, Н. Н. Синицин // Ученые записки Череповецкого государственного университета. – 2011. – №1. – С. 80–81.