

## Экономико-математическое моделирование для решения задач сравнительной оценки технико-экономической эффективности строительства и реконструкции систем теплоснабжения

*А.В. Бондарев*

*Военная академия материально-технического обеспечения, Санкт-Петербург*

**Аннотация:** В статье представлено решение задачи технико-экономической эффективности капитальных вложений при реконструкции систем теплоснабжения муниципальных и ведомственных образований РФ с использованием критериев выбора рационального варианта реконструкции. Разработана экономико-математической модели с применением модифицированных двухфакторных производственных функций Кобба-Дугласа в относительных координатах.

**Ключевые слова:** система теплоснабжения, высокотемпературный кипящий слой, капитальные затраты, эксплуатационные расходы, экономико-математическое моделирование, производственные функции.

Строительство и реконструкция систем теплоснабжения, включающих котельные и тепловые сети, сопряжено с существенными капитальными затратами, которые могут достигать 30 млн. рублей на 1 МВт установленной мощности. В таких условиях актуальной становится задача выбора приоритетного варианта технических решений по критерию технико-экономической эффективности [1]. Решение такой задачи традиционным методом требует дорогостоящих и длительных предпроектных вариантных проработок на стадии «Технико-экономическое обоснование».

Постановка задачи оценки технико-экономической эффективности капитальных вложений при реконструкции систем теплоснабжения муниципальных и ведомственных образований РФ формируется с использованием в качестве критерия выбора рационального варианта реконструкции срока окупаемости капитальных вложений  $\tau$ , вида:

$$\tau = K / \Delta C \quad (1)$$

где:

$K$  - капитальные затраты на реконструкцию систем теплоснабжения;

---

$\Delta C$ - экономия годовых эксплуатационных расходов.

Тогда постановка задачи определяется следующим образом:

$$\tau = f(K, C, Z) \rightarrow \tau \leq \tau_n \quad (2)$$

где:  $\tau_n$ – нормативный срок окупаемости капитальных вложений (для энергетики принят равным 8,4 лет);

$C$  – годовые эксплуатационные расходы;

$Z$  – приведенные затраты.

$$Z = C + p_n K \quad (3)$$

$p_n$ – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений, (для энергетики принят равным 0,12).

В последние годы находят применение методы экономико-математического моделирования на основе производственных функций, с использованием которых оценки технико-экономической эффективности строительства и реконструкции систем теплоснабжения может производиться по удельным показателям.

Современные системы теплоснабжения представляют собой достаточно сложные технические системы с большим количеством разнообразных по своему функциональному назначению элементов и показателей. Характерным для них является общность технологического процесса получения пара или горячей воды в котлах за счет энергии, выделяемой при сжигании органического топлива. Это позволяет в экономико-математических моделях не рассматривать внутренние связи и схемы, а учитывать только конечный результат их производства и транспортировки тепловой энергии.

В качестве конечного показателя работы системы теплоснабжения установки выступает годовое количество выработанной теплоты  $Q_{\text{выр}}$ , который зависит от целого ряда факторов.

---

При разработке структурной схемы экономико-математической модели системы теплоснабжения (рис. 1) материальные потоки ресурсов представляются в виде экономических (стоимостных) показателей.

В качестве выходного показателя выступает величина годовых эксплуатационных расходов  $C$ , которая связана с количеством выработанной теплоты через ее себестоимость  $c_{yd}$  ( $C = c_{yd} \cdot Q_{выр}$ ). Также в качестве выходного



Рис 1. Схема экономико-математической модели системы теплоснабжения с отопительными и отопительно-производственными котельными установок низкого давления

показателя может выступать величина приведенных затрат  $Z$ , которая используется при технико-экономическом сравнении различных вариантов.

В качестве входных факторов, определяющих выходную величину  $C$ , можно считать материальные затраты на производство теплоты  $C_m$ , которые включают расходы на топливо  $C_t$ , на воду  $C_v$ , на электроэнергию  $C_{эл}$ , заработную плату  $C_{з.п}$  и общекотельные расходы  $C_{общ}$ , а также затраты учитывающие первоначальные единовременные капитальные затраты  $K$ , в виде доли от них  $pK$ , включающие амортизационные отчисления  $p_{ам}K$  и

отчисления на текущий ремонт оборудования  $p_{m,p}K$ , где  $p_{ам}$  и  $p_{m,p}$  – коэффициенты определяющие долю отчислений. В случае использования в качестве выходного показателя величину приведенных затрат  $Z$ , дополнительно необходимо учитывать нормативные отчисления  $p_n K$ , где  $p_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ( $p_n = 0,12$ ).

С целью сокращения числа переменных произведено агрегирование показателей. К общим материальным затратам  $C_m$  при эксплуатации котельных отнесены расходы на топливо, электроэнергию, воду, заработную плату и общекотельные расходы. Отчисления на амортизацию, текущий ремонт, а также на окупаемость капиталовложений (для приведенных затрат  $Z$ ) представлены в виде суммарной доли  $p$  от начальных капитальных затрат  $K$  ( $pK$ ).

При этом, очевидно, при увеличении капитальных затрат снижаются годовые эксплуатационные расходы на материальные ресурсы  $C_m$  и увеличиваются годовые эксплуатационные расходы, зависящие от капитальных затрат,  $pK$ .

Функции вида  $C = f(pK, C_m)$  принято называть двухфакторными производственными функциями.

Предложенная модель является единой для систем теплоснабжения со всеми группами котельных и типами и способами прокладки тепловых сетей, основанной на общности технологического процесса, устройства, компоновки и режимов работы, на базе которой возможно построение различных видов производственных функций с основными или агрегированными входными параметрами при выражении выходных характеристик в тепловых или стоимостных величинах.

Проведенный анализ различных видов производственных функций показал, что наиболее простой и удобной для анализа является функции Кобба-Дугласа [2, 3], вида:

$$C = AK^{\alpha} C_m^{\beta} \quad (4)$$

$$Z = A_1(K)^{\alpha} C_m^{\beta} \quad (5)$$

Положительный опыт использования методов экономико-математического моделирования для оценки технико-экономических показателей котельных получен в работах Морозова Б.И. [4, 5]. Дальнейшее развитие данного направления имеет место в диссертационных исследованиях Роды И.С., в которых разработана методика сравнительной оценки технико-экономической эффективности строительства и реконструкции угольных котельных с применением технологии сжигания в топлива в высокотемпературном кипящем слое. В ней по значениям отношений капитальных затрат и экономии годовых эксплуатационных расходов для сравниваемых вариантов реконструкции определяется положение рабочей точки по отношению кривой замещения материальных ресурсов, по которому можно сделать вывод о том, какой будет срок окупаемости капитальных вложений, больше или меньше нормативного.

Кроме того, все результаты получены без учета затрат на автоматизацию котлов кипящего слоя, затрат на реконструкцию тепловых сетей, и экономического ущерба от низкой надежности оборудования и трубопроводов.

В продолжение работ Морозова Б.И. и Роды И.С. в военном институте (инженерно-техническом) Военной академии материально-технического обеспечения с участием автора выполнены масштабные исследования технико-экономических показателей систем теплоснабжения с источниками теплоты в виде угольных котельных [6-8].

---

Отличительной особенностью разработанной экономико-математической модели в данных работах является применение модифицированных двухфакторных производственных функций Кобба-Дугласа в относительных координатах.

Для определения вида таких функции необходимо записать уравнения двухфакторной производственной функции Кобба-Дугласа применительно к годовым эксплуатационным расходам  $C$  для некоторого исходного («базового») варианта СТС с параметрами  $C_0$ ,  $K_0$  и  $C_{m0}$  и для рассматриваемого варианта СТС с параметрами  $C$ ,  $K$  и  $C_m$ :

$$C_0 = AK_0^\alpha C_{m0}^\beta \quad (6)$$

$$C = AK^\alpha C_m^\beta \quad (7)$$

где  $A$  – параметр функции Кобба-Дугласа;

$\beta$  - коэффициент эластичности, характеризующий долю составляющей годовых эксплуатационных расходов, зависящей от материальных ресурсов;

$\alpha$  - коэффициент эластичности, характеризующий долю составляющих годовых эксплуатационных расходов, зависящих от капитальных затрат.

Коэффициенты эластичности по ресурсам  $\alpha$  и  $\beta$  – показывают на сколько % увеличится (уменьшится)  $C$  при увеличении (уменьшении) ресурса  $K$ ,  $C_m$  на 1 %

$$\alpha = \frac{\partial C}{\partial K} \frac{K}{C}; \quad \beta = \frac{\partial C}{\partial C_m} \frac{C_m}{C}. \quad (8)$$

Разделив выражение (8.18) на (8.17), получим:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{AK^\alpha C_m^\beta}{AK_0^\alpha C_{m0}^\beta} \quad (9)$$

Предполагается, что исходный и рассматриваемый варианты относятся к одной группе системы теплоснабжения. Это означает, что и в том и другом варианте должны быть равные тепловые нагрузки и одинаковые

протяженности и способы прокладки тепловых сетей. Тогда, для таких условий имеет место равенство коэффициентов  $A$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ , а также  $C = C_0$ , а выражение (10) приобретает следующий вид:

$$1 = \left( \frac{K}{K_0} \right)^\alpha \left( \frac{C_M}{C_{M_0}} \right)^\beta \quad (10)$$

Из этого выражения получается уравнение кривой замещения в относительных координатах  $K/K_0$ ,  $C_M/C_{M_0}$ :

$$\frac{K}{K_0} = \left( \frac{C_{M_0}}{C_M} \right)^{\frac{\beta}{\alpha}} \quad (11)$$

Величина соотношения коэффициентов эластичности  $\beta/\alpha$  характеризует соотношение материальной составляющей годовых эксплуатационных расходов и составляющей, зависящей от капитальных затрат. Соотношение  $\beta/\alpha$  существенно зависит от типа котлов (паровые, водогрейные), мощности котельной (малая, до нескольких МВт или средняя, несколько десятков МВт), вида топлива (уголь, газ, мазут), и типа прокладки тепловых сетей (бесканальная, в непроходных каналах, надземная).

Для определения значений капитальных затрат  $K$  и  $K_0$  в математической модели использованы однофакторные производственные функции, представленные зависимостями вида:

$$k_{уд} = A_1 Q_{уст}^{n_1}, \quad c_{уд} = A_4 Q_{уст}^{n_2}, \quad z_{уд} = A_5 Q_{уст}^{n_3}. \quad (12)$$

где:

$Q_{уст}$  – установленная тепловая мощность СТС;

$A_1, A_4, A_5, n_1, n_2, n_3$  – параметры однофакторных производственных функций;

$$k_{уд} - \text{удельные капитальные затраты, } k_{уд} = \frac{K}{Q_{уст}} \quad (13)$$

$c_{yd}$ - себестоимость тепловой энергии;

$z_{yd}$ - удельные приведенные затраты.

$$z_{yd} = \frac{Z}{Q_{omn}^{год}} = \frac{C + p_n K}{Q_{omn}^{год}} \quad (14)$$

$$c_{yd} = \frac{C}{Q_{omn}^{год}} \quad (15)$$

$Q_{omn}^{год}$  – количество отпущенной теплоты за год.

На основе результатов по экономико-математическому моделированию разработана методика сравнительной оценки технико-экономической эффективности строительства и реконструкции систем теплоснабжения с угольными котельными [9, 10]. Методика основана на использовании универсальной диаграммы семейства кривых замещения материальных ресурсов для различных соотношений коэффициентов эластичности  $\beta/\alpha$ , характеризующих соотношение материальной составляющей годовых эксплуатационных расходов и составляющей, зависящей от капитальных затрат. Методика позволяет выполнять сравнительную оценку технико-экономической эффективности капитальных вложений для систем теплоснабжения при различных способах прокладки тепловых сетей, котельных с ручными, механизированными слоевыми котлами и автоматизированными котлами высокотемпературного кипящего слоя, а также с учетом всех составляющих экономии годовых эксплуатационных расходов (повышения КПД котлов, снижения потерь теплоты в тепловых сетях, снижения экономического ущерба от низкой надежности и др.

### Литература

1. Петренко Л.К., Карандина Е.В., Манжилевская С.Е. Методы формирования программы технико-экономического обоснования реконструкции объектов// Инженерный вестник Дона, 2013, №3 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1961](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1961).

---

2. McKenzie L. W. Turnpike theory. – *Econometrica*, 1976, 44, № 5, pp. 841 – 865.

3. Cobb G.W., Douglas P.H. A theory of production. // *Amer. Econ. Rev.*, 1928, March, Suppl., pp. 139 – 165.

4. Морозов Б.И. Использование экономико-математических методов для оценки характеристик отопительно-производственных котельных // *Военная наука и образование городу: Тезисы докладов 1 Городской научно-практической конференции 20 - 22 мая 1997 г. СПб. 1997. Ч.1. С. 186.*

5. Сомов В.В., Морозов Б.И. Оценка замещаемости материальных ресурсов при проектировании и строительстве котельных установок // *Научные и практические вопросы совершенствования теплоэнергетических установок малой мощности. ВИТУ. 1998. Выпуск 5. С. 48-55.*

6. Смолинский С.Н. К вопросу технико-экономической оценки модернизации систем теплоснабжения с автоматизированными угольными котельными с котлами высокотемпературного кипящего слоя // *«Военный инженер»*. 2017. №2(4).С. 42-47.

7. Бондарев А.В., Морозов Б.И., Смолинский С.Н. Оценка технико-экономической эффективности реконструкции систем теплоснабжения с применением угольных котлов высокотемпературного кипящего слоя// *Двигателестроение*». 2017. №4. С. 34-40.

8. Смолинский С.Н. Оценка технико-экономической эффективности модернизации систем теплоснабжения с автоматизированными котельными с котлами высокотемпературного кипящего слоя *Труды // Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. СПб. 2017, №656. 6 с.*

9. Бондарев А.В., Морозов Б.И., Смолинский С.Н., Росляков Е.М. Сравнительная оценка эффективности капитальных вложений при модернизации систем теплоснабжения на основе теории производственных функций // *Двигателестроение*». 2018. №1. С. 30-33.

---



10. Бондарев А.В. Концептуальные основы создания систем автоматизации котлов малой мощности с кипящим слоем при строительстве и реконструкции угольных котельных // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5231](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5231).

### References

1. Petrenko L.K., Karandina E.V., Manzhilevskaya S.E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1961](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1961).
2. McKenzie L. W. Turnpike theory. *Econometrica*, 1976, 44, № 5, pp. 841 – 865.
3. Cobb G.W., Douglas P.H. A theory of production. *Amer. Econ. Rev.*, 1928, March, Suppl., pp. 139 – 165.
4. Morozov B.I. Voennaya nauka i obrazovanie gorodu: Tezisy dokladov 1 Gorodskoj nauchno-prakticheskoy konferencii 20 - 22 maya 1997 g. SPb. 1997. CH.1. p. 186.
5. Somov V.V., Morozov B.I. VITU. 1998. Vypusk 5. pp. 48-55.
6. Smolinskij S.N. Voennyj inzhener. 2017. №2 (4). pp. 42-47.
7. Bondarev A.V., Morozov B.I., Smolinskij S.N. Dvigatestroenie. 2017. №4. pp. 34-40.
8. Smolinskij S.N. Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F.Mozhayskogo. SPb. 2017. №656. 6 p.
9. Bondarev A.V., Morozov B.I., Smolinskij S.N., Roslyakov E.M. Dvigatestroenie. 2018. №1. pp. 30-33.
10. Bondarev A.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5231](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5231).