

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 620:621.31

**Е. Е. НИКИТИН**, канд. техн. наук  
Институт газа НАН Украины, г. Киев

## ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОЕКТОВ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ФИНАНСОВЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ

*Предложено решение задачи оптимизации выбора энергоэффективных проектов в условиях финансовых ограничений на основании использования комплекса критериев, которое может быть использовано при формировании городских, областных, отраслевых, а также целевых программ энергоэффективности при наличии большого количества альтернатив.*

*Ключевые слова:* технико-экономическая эффективность, оптимизация систем теплоснабжения, энергоэффективный проект

Опыт решения проблемы энергоэффективности в Украине за последние 10–15 лет указывает на необходимость разработки новых подходов к содержанию и условиям реализации программ повышения энергоэффективности, при этом одной из ключевых проблем является их финансовое обеспечение [1]. Реализация таких программ требует огромных финансовых ресурсов, которые в условиях существующих финансово-экономических трудностей не могут быть обеспечены в полном объеме. Поэтому особую актуальность приобретает задача оптимального выбора приоритетных энергоэффективных проектов.

Аналізу проблем в комунальній теплоенергетиці та розробці шляхів їх рішення посвящен ряд робіт [2–5]. Цілью нинішнього дослідження є розробка науково обґрунтованого підходу по вибору енергоефективних проектів в умовах великого числа альтернатив та обмеженого фінансування.

Содержательная постановка задачи об оптимальном выборе энергоэффективных проектов может быть сформулирована следующим образом. Имеется определенное количество возможных проектов, каждый из которых может быть реализован в определенном объеме. Имеются определенные ограничения по объему реализации каждого из проектов. Для каждого из про-

ектов известны экономия, которая достигается при его реализации, а также необходимые капитальные затраты. Общая сумма финансовых ресурсов, которые могут быть израсходованы на реализацию всей совокупности проектов, не может превышать определенной известной величины. Требуется определить объемы реализации каждого из проектов таким образом, чтобы максимизировать экономию, которая будет достигнута после их реализации.

Для того чтобы сформулировать математическую постановку рассматриваемой задачи, введем в рассмотрение следующие понятия и величины:

$1, 2, \dots, i, \dots, n$  – номер проекта;

$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$  – объем реализации соответствующего проекта;

$X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$  – максимально возможный объем реализации соответствующего проекта;

$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_{in}$  – годовая экономия, достигаемая в результате реализации соответствующего проекта;

$\mathcal{e}_1, \mathcal{e}_2, \dots, \mathcal{e}_i, \dots, \mathcal{e}_n$  – удельная (отнесенная к объему реализации) годовая экономия, достигаемая в результате реализации соответствующего проекта;

$K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_n$  – затраты на реализацию соответствующего проекта;

$\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_i, \dots, \kappa_n$  – удельные (отнесенные к объему реализации) затраты на реализацию соответствующего проекта;

© Е.Е. НИКИТИН, 2011

$K$  – объем располагаемых финансовых ресурсов, которые могут быть использованы для реализации всей совокупности рассматриваемых проектов;

$\mathcal{E}$  – суммарная экономия, достигаемая в результате реализации энергоэффективных проектов;

$T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n$  – срок окупаемости соответствующего проекта.

Сделаем допущение о том, что достигаемая экономия и капитальные затраты прямо пропорциональны объему реализации проекта, т. е.  $\mathcal{E}_i = x_i \mathcal{e}_i, K_i = x_i \kappa_i$ . Кроме того, предположим, что объем реализации одного проекта не влияет на объем реализации других проектов, что в общем случае справедливо не для всех проектов. Однако рассмотрение взаимного влияния проектов является предметом отдельного исследования [6].

Используя сделанные допущения, введенные понятия и величины, математическую постановку задачи об оптимальном выборе проектов можно сформулировать в следующем виде:

$$\mathcal{E} = \mathcal{e}_1 x_1 + \mathcal{e}_2 x_2 + \dots + \mathcal{e}_i x_i + \mathcal{e}_n x_n \rightarrow \max_{x \in \Delta \beta}, \quad (1)$$

где множество допустимых альтернатив формируется следующей системой ограничений в виде неравенств:

$$\kappa_1 x_1 + \kappa_2 x_2 + \dots + \kappa_i x_i + \dots + \kappa_n x_n \leq K, \quad (2)$$

$$x_1 \leq X_1, x_2 \leq X_2, \dots, x_i \leq X_i, \dots, x_n \leq X_n, \quad (3)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_i \geq 0, \dots, x_n \geq 0. \quad (4)$$

Выражение (1) описывает целевую функцию, представляющую собой суммарную экономию, достигаемую при реализации проектов. Неравенство (2) представляет собой финансовое ограничение. Неравенства (3) являются ограничениями на объем реализации каждого из проектов, а неравенства (4) являются очевидными условиями неотрицательности величин, которые характеризуют объемы реализации проектов.

Необходимо отметить, что рассматриваемая задача имеет смысл при условии

$$\kappa_1 X_1 + \kappa_2 X_2 + \dots + \kappa_i X_i + \dots + \kappa_n X_n > K, \quad (5)$$

которое состоит в том, что объем располагаемых финансовых ресурсов меньше, чем объем

финансовых ресурсов, необходимый для реализации всех проектов в полном объеме. Отсутствие условия (5) означает, что все проекты могут быть реализованы в полном объеме, поэтому задача оптимизации теряет смысл.

Сформулированная задача принадлежит к классу задач линейного программирования и для ее решения использован специальный инструмент электронных таблиц MS Excel, “Поиск решений” [7].

Рассмотрим пример решения задачи выбора из шести проектов ( $n=6$ ) для модернизации системы теплоснабжения населенного пункта:

Проект 1. Модернизация устаревших газовых котлов (например, путем замены горелок или установки теплоутилизаторов).

Проект 2. Замена старых газовых котлов на новые с более высоким КПД.

Проект 3. Перевод газовых котлов на биомассу.

Проект 4. Установка тепловых насосов.

Проект 5. Замена изношенных участков труб тепловых сетей на предварительно изолированные трубы.

Проект 6. Термомодернизация зданий.

Каждый  $i$ -й проект может быть реализован в определенном объеме, который характеризуется величиной  $x_i$ . Физический смысл и размерность этих величин определяется характером конкретного проекта. Так, для первых четырех рассматриваемых проектов эта величина представляет собой установленную мощность тепловых источников, которая выражается в кВт, для пятого проекта – это площадь поверхности заменяемых труб тепловых сетей, выраженная в  $m^2$ , а для шестого проекта – это площадь термомодернизируемых зданий, выраженная в  $m^2$ .

На объем реализации каждого  $i$ -го проекта  $x_i$  накладывается определенное ограничение  $X_i$ , величина которого определяется на основании детального анализа конкретной ситуации. Например, максимальная установленная мощность заменяемых или модернизируемых котлов не должна значительно превышать присоединенную тепловую нагрузку; максимальная установленная мощность котлов, переводимых с природного газа на биомассу, должна определяться с учетом имеющихся в рассматриваемом районе объемов биомассы; максимальная установленная мощность тепловых насосов должна определяться с учетом мощности имеющихся низкопотенциальных источников тепловой

Однокритериальная задача об оптимальном выборе проектов						
Показатель	Проекты					
	1	2	3	4	5	6
Оптимальный объем реализации, кВт (м <sup>2</sup> )	10000,0	15000,00	5000,00	1500,00	0,00	0,00
Кап. затраты, млн грн	4,00	12,00	8,00	6,00	0,00	0,00
Максимальный объем реализации, кВт (м <sup>2</sup> )	10000,0	15000,00	5000,00	3000,00	50000,00	100000,0
Удельные кап. затраты, грн/кВт (грн/м <sup>2</sup> )	400,00	800,00	1600,00	4000,00	1000,00	8000,00
Удельная годовая экономия по проекту	200,00	300,00	500,00	800,00	150,00	900,00
Срок окупаемости, лет	2,00	2,667	3,200	5,00	6,667	8,889
Целевая функция, млн грн	10,20					
Фактические затраты, млн грн	30,00					
Располагаемые финансовые ресурсы, млн грн	30,00					
Необходимый объем финансирования, млн грн	886,00					

Рис. 1. Исходные данные и результат решения задачи о проектах по критерию экономичности

энергии; площадь термомодернизируемых зданий может быть ограничена, например, существующей площадью учреждений бюджетной сферы. Полагаем также, что для каждого  $i$ -го проекта известны величины удельной годовой экономии  $\varepsilon_i$  и удельных капитальных затрат  $\kappa_i$ .

Необходимо отметить, что определение величин  $K$ ,  $X_i$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $\kappa_i$  является важным этапом анализа проблемной ситуации, однако подробные комментарии по этому поводу выходят за рамки настоящего исследования, нацеленного на изложение общего методического подхода. Определение этих величин является предметом энергетического обследования, разработки технико-экономических обоснований отдельных проектов и финансового анализа ситуации [8].

Общий вид электронной таблицы MS Excel для решения рассматриваемой задачи с исходными данными  $K$ ,  $X_i$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $\kappa_i$  и результатами расчетов  $x_i$  представлен на рис. 1.

Выше была рассмотрена задача оптимизации выбора проектов по критерию максимизации достигаемой экономии. Не подвергая сомнению важность и приоритетность этого критерия, необходимо отметить наличие и других критериев, которые должны учитываться при выборе проектов модернизации систем теплоснабжения:

повышение надежности системы теплоснабжения – очевидно, что в рассмотренном примере реализация проекта 5 в наибольшей мере будет способствовать повышению надежности системы теплоснабжения, однако, при рассмотренном выше подходе, объем реализации этого проекта оказался равным  $x_5=0$ ;

повышение энергетической независимости системы теплоснабжения. Реализация проекта 4 будет способствовать повышению энергетиче-

ской независимости системы теплоснабжения, поскольку снизит долю природного газа благодаря использованию электроэнергии для теплоснабжения; однако отсутствие учета критерия повышения энергетической независимости системы теплоснабжения в рассмотренной выше модели снижает оптимальный объем реализации этого проекта до  $x_4=1500$  кВт, при максимально возможном объеме его реализации  $X_4=3000$  кВт;

социальные выгоды проекта – безусловно, реализация проекта 6 будет иметь наибольшие социальные выгоды, поскольку не только уменьшится потребление топливно-энергетических ресурсов на теплоснабжение зданий, но повысится комфортность теплового режима зданий, а также улучшится их внешний вид; однако отсутствие учета критерия социальных выгод проекта приводит к тому, что объем реализации этого проекта  $x_6=0$  м<sup>2</sup>.

Приведенные выше примеры свидетельствуют о необходимости расширения количества критериев, которые необходимо принимать во внимание при оптимизации выбора проектов.

Выражение для определения срока окупаемости проекта  $T_i$  имеет вид

$$T_i = \kappa_i / \varepsilon_i. \tag{6}$$

Тогда годовая экономия от реализации проекта может быть записана в следующем виде:

$$\varepsilon_i = \kappa_i / T_i. \tag{7}$$

С учетом (7) выражение (1) может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & x_1 \kappa_1 / T_1 + x_2 \kappa_2 / T_2 + \dots + \\ & + x_i \kappa_i / T_i + \dots + x_n \kappa_n / T_n \rightarrow \max. \end{aligned} \tag{8}$$

В выражении (8) величина срока окупаемости капитальных затрат  $T_i$  играет роль ранга проекта по критерию экономичности. В общем случае ранг может отображать не только экономические, но и другие выгоды проекта, в частности те, которые рассмотрены выше.

Имея цель расширить номенклатуру критериев при выборе проектов и взяв за основу структуру выражения (8), комплексный критерий оценки полезности рассматриваемой совокупности проектов можно представить в виде

$$P = x_1 k_1 / T_{1cp} + x_2 k_2 / T_{2cp} + \dots + x_n k_n / T_{ncp} \rightarrow \max, \quad (9)$$

где  $T_{icp}$  – средний ранг  $i$ -го проекта, сформированный на основании  $p$  критериев:

$$T_{icp} = (T_{i1} + T_{i2} + \dots + T_{i\alpha} + \dots + T_{ip}) / p, \quad (10)$$

где  $T_{i\alpha}$  – ранг  $i$ -го проекта по критерию  $\alpha$ .

В рамках настоящего подхода в качестве первого критерия рассматривается срок окупаемости капитальных затрат. В качестве второго и третьего критерия будем рассматривать критерий влияния проекта на повышение надежности системы теплоснабжения и критерий дополнительных выгод проекта. В общем случае можно принять во внимание и другие критерии, что не нарушает общность рассматриваемого подхода.

В отличие от первого критерия, который может быть определен с помощью аналитического выражения (6), определение других критериев с помощью тех или иных аналитических зависимостей в общем случае затруднительно, что вынуждает прибегнуть к использованию экспертных оценок. Метод экспертных оценок имеет ряд модификаций. Основным путем преодоления субъективизма, который, безусловно, присущ этому методу, является использование коллективных оценок. При этом важным моментом является подбор квалифицированных и объективных экспертов. Известен метод присвоения рангов и вычисления средних арифметических рангов, который используется при выборе проектов [9].

Применительно к рассматриваемой задаче должен быть решен вопрос выбора единой шкалы для присвоения рангов рассматриваемой совокупности проектов по различным критериям. При выборе шкалы за основу принят критерий технико-экономической эффективности проекта. При этом в качестве ранга про-

екта используется срок окупаемости капитальных затрат.

Срок окупаемости капитальных затрат разнообразных проектов по модернизации систем теплоснабжения, как показывает опыт их разработки, может изменяться в диапазоне от 0,1...0,3 до 10 лет и выше. Проекты со сроком окупаемости менее 1 года встречаются редко, а проекты со сроком окупаемости более 10 лет в рамках настоящего рассмотрения не представляют существенного практического интереса. Поэтому, исходя из практических соображений, диапазон изменения сроков окупаемости капитальных затрат рассматриваемых проектов может быть ограничен величинами 1...10 лет.

Принимая во внимание рассмотренную выше количественную оценку ранга проектов по критерию экономичности, представляется логичным и целесообразным использовать для других критериев оценки такую же шкалу. Иными словами, предлагается ранг проектов по различным критериям оценивать в диапазоне 1...10, при этом, чем меньше количественный показатель, тем выше ранг.

Проиллюстрируем предложенный подход примером с использованием рассмотренных ранее проектов 1–6. При этом ранг проектов будем оценивать по трем критериям – экономичности, надежности и дополнительных выгод. Понятие дополнительных выгод проекта включает в себя повышение энергетической независимости системы теплоснабжения и социальные выгоды. В общем случае количество рассматриваемых критериев может быть иным, что не изменяет принципиального подхода к решению рассматриваемой задачи.

Общий вид электронной таблицы MS Excel для решения многокритериальной задачи представлен на рис. 2.

Ранг проектов по критерию экономичности принят таким же, как и в предыдущем примере и соответствует срокам окупаемости капитальных затрат этих проектов. Ранг проектов по другим критериям определяется методом экспертных оценок. Очевидно, что основным проектом, реализация которого будет приводить к значительному повышению надежности системы теплоснабжения, является проект 5 по замене труб тепловых сетей, поскольку именно этот элемент является наименее надежным в системе теплоснабжения. Предположим, что по

Задача оптимального выбора проектов по критериям экономичности, надежности и дополнительных выгод						
Показатель	Проекты					
	1	2	3	4	5	6
Оптимальный объем реализации, кВт (м <sup>2</sup> )	0,00	0,00	5000,00	0,00	22000,0	0,00
Кап. затраты, млн грн	0,00	0,00	8,00	0,00	22,00	0,00
Максимальный объем реализации, кВт (м <sup>2</sup> )	10000	15000	5000	3000	50000	100000
Удельные кап. затраты, грн/кВт (грн/м <sup>2</sup> )	400,00	800,00	1600,00	4000,00	1000,00	1000,00
Удельная годовая экономия, грн/кВт (грн/м <sup>2</sup> )	200,00	300,00	500,00	800,00	150,00	120,00
Рейтинг по экономичности (срок окупаемости), лет	2,00	2,667	3,200	5,00	6,667	8,333
Рейтинг по надежности	9,00	9,00	9,00	9,00	3,00	9,00
Рейтинг по дополнительным выгодам	9,00	9,00	6,00	7,00	9,00	4,00
Усредненный рейтинг	6,667	6,889	6,067	7,00	6,222	7,111
Целевая функция	4854395,65					
Фактические затраты, млн грн	30,00					
Располагаемые финансовые ресурсы, млн грн	30,00					
Необходимый объем финансирования, млн грн	186,00					

**Рис. 2.** Исходные данные и результат решения задачи о проектах по критериям экономичности, надежности и дополнительных выгод

субъективной оценке экспертов этому проекту присвоен достаточно высокий ранг 3. Другие проекты не оказывают существенного влияния на повышение надежности системы теплоснабжения, поэтому им присвоен низкий ранг 9.

На основании аналогичных рассуждений присвоены ранги проектам по критерию дополнительных выгод. Термомодернизация зданий (проект 6), будет приводить к улучшению внешнего вида зданий и нормализации температурного режима. С учетом этих соображений проекту присвоен достаточно высокий ранг 4. Проекты по переводу котлов на биомассу (проект 3) и установке тепловых насосов (проект 4) будут приводить к повышению энергетической независимости системы теплоснабжения за счет частичного замещения природного газа биотопливом и электроэнергией. Кроме того, перевод котлов на биомассу (проект 3) будет способствовать созданию дополнительных рабочих мест в регионе. С учетом этих соображений проектам присвоены ранги, соответственно, 6 и 7.

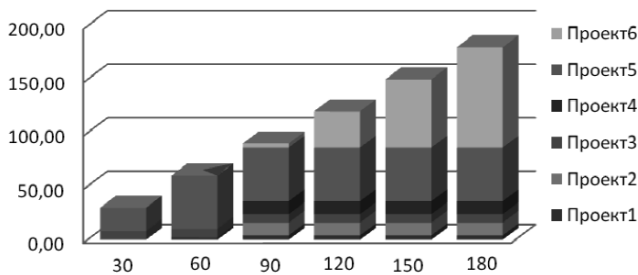
Можно рассматривать не только ранги проектов по определенному критерию, но и ранги критериев. Сумма рангов по определенному критерию может рассматриваться как ранг этого критерия. Видно, что критерии в порядке

уменьшения их рангов расположены следующим образом: экономичность, дополнительные выгоды, надежность.

С учетом присвоенных рангов по критериям экономичности, надежности и дополнительных выгод проекты в порядке уменьшения усредненного ранга располагаются следующим образом: перевод котлов на биомассу – 6,067; замена труб тепловых сетей – 6,222; модернизация котлов – 6,667; замена котлов – 6,889; установка тепловых насосов – 7,000; термомодернизация зданий – 7,111. Комплексный критерий оценки полезности рассматриваемой совокупности проектов (9) будет принимать максимальное значение, если два первых проекта будут реализованы в полном объеме, а третий по рейтингу проект будет реализован частично таким образом, чтобы удовлетворялось финансовое ограничение (2).

Разработанная математическая модель позволяет проанализировать влияние различных факторов на оптимальное распределение объемов реализации рассматриваемых проектов. В качестве примера, рассмотрим влияние объема располагаемых финансовых ресурсов (рис. 3).

Если объем располагаемых финансовых ресурсов составляет 30 млн грн, то целесообразно финансировать проект 3 в полном объеме



**Рис. 3.** Оптимальное распределение финансовых ресурсов между проектами при разных объемах финансирования, млн грн

и частично проект 5. Если объем располагаемых финансовых ресурсов увеличится до 60 млн грн, то целесообразно финансировать проекты 3 и 5 в полном объеме и частично проект 1. По мере увеличения объема располагаемых финансовых ресурсов номенклатура проектов, которые целесообразно финансировать, расширяется за счет новых в соответствии с их рангом. После того как располагаемое финансирование станет больше определенной величины (86 млн грн), финансируются все проекты. При этом проект с минимальным рангом (проект 6) финансируется по остаточному принципу. После того как располагаемое финансирование достигнет величины 186 млн грн, все проекты могут быть профинансированы в полном объеме. Если располагаемое финансирование больше 186 млн грн, то, как отмечалось выше, задача оптимизации выбора проектов теряет смысл.

Можно также рассмотреть влияние и других факторов, например, таких как изменение ограничений на реализацию проектов и изменение их рейтинга. Анализ результатов расчетного исследования, проведенного с использованием разработанной математической модели, позволяет сформулировать достаточно простое правило оптимального выбора проектов в условиях финансовых ограничений: проекты должны реализовываться в порядке, соответствующем их рангу, в максимально полном объеме с учетом имеющихся ограничений до полного использования имеющихся финансовых ресурсов.

Разработанный методический подход и математическая модель могут быть использованы для различных энергетических систем, в частности для систем теплоснабжения населенных пунктов и промышленных предприятий. Этот подход и математическая модель

могут быть полезны при формировании городских, областных, отраслевых и целевых программ энергоэффективности, которые реализуются в условиях ограниченного финансирования и наличия большого числа альтернативных проектов.

## ВЫВОДЫ

Приведена содержательная и математическая постановка задачи оптимизации выбора энергоэффективных проектов в условиях финансовых ограничений. В качестве критерия оптимизации использован комплексный экспертно-аналитический показатель полезности энергоэффективных проектов, учитывающий их технико-экономическую эффективность, влияние на повышение надежности и дополнительные выгоды проекта.

Показано, что сформулированная задача принадлежит к классу задач линейного программирования. Рассмотрено ее решение с помощью специального инструмента "Поиск решений", который присутствует в широко распространенном MS Excel.

Выполнено расчетное исследование влияния различных факторов на оптимальное распределение объемов реализации конкретных проектов по энергоэффективной модернизации систем теплоснабжения населенных пунктов. Сформулировано правило оптимального выбора проектов в условиях финансовых ограничений: проекты должны реализовываться в порядке, соответствующем их рангу, в максимально полном объеме с учетом имеющихся ограничений до полного использования имеющихся финансовых ресурсов.

Разработанный методический подход и математическая модель могут быть использованы для систем теплоснабжения населенных пунктов и других различных энергетических систем при формировании городских, областных, отраслевых и целевых программ энергоэффективности, которые реализуются в условиях ограниченного финансирования и наличия большого количества альтернативных предложений.

1. Кулик М.М., Гнідий М.В., Білодід В.Д. Основи політики підвищення енергетичної ефективності та головні заходи з енергозбереження в економіці України // Проблеми загальної енергетики. – 2007. – № 15. – С. 7–16.

2. Кулик М.М., Куц Г.О., Білодід В.Д. Аналіз стану розвитку систем теплопостачання в Україні // Проблеми загальної енергетики. – 2006. – № 14. – С. 13–24.
3. Карп И.Н., Никитин Е.Е., Пьяных К.Е., Зайцев А.Н. Направления замещения природного газа альтернативными видами топлива и энергии в промышленности и коммунальной энергетике // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – № 4. – С. 16–26.
4. Долінський А.А., Басок Б.І., Базеев Є.Т., Кучин Г.П. Основні положення концепції Національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України // Пром. теплотехніка. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 68–78.
5. Долінський А.А. К вопросу энергоэкономической оптимизации энергетических систем // Пром. теплотехніка. – 2009. – Т.31, №4. – С. 105–109.
6. Никитин Е.Е. Системный подход к выбору мероприятий по энергоэффективности при модернизации систем теплоснабжения в условиях финансовых ограничений // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2009. – № 1. – С. 18–27.
7. Леоненков А.В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 704 с.
8. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали в 2-х томах: Механізми реалізації політики енергозбереження / За ред. В.А. Жовтянського, М.М. Кулика, Б.С. Стогнія. – К.: Академперіодика, 2006. – Т.2. – 600 с.
9. Орлов А.И. Теория принятия решений: учебник. – М.: Издательство Экзамен, 2006. – 573 с.

*Надійшла до редколегії: 28.04.2011*