

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ЭНЕРГОСЕРВИСА: ОСОБЕННОСТИ ВЕРИФИКАЦИИ ДАННЫХ

С.В. Гужов

к.т.н., доцент НИУ «МЭИ», Москва, Российская Федерация

Внедрение такого механизма государственно-частного партнёрства, как энергосервисные контракты, сталкивается в России с рядом сложностей. В статье рассмотрены проблемы связанные с верификацией технологического эффекта, экономического эффекта. Показаны индикаторы социальных эффектов. Дано описание существующих методик верификации технологического эффекта, описана разработанная методика. Показано сравнение описанных методик. Показано преимущество разработанной отечественной методики верификации данных на примере технико-экономических расчётов для существующего объекта.

Ключевые слова: энергосбережение, методика верификации данных, социальный эффект, функция состояния качества жизни, экономический эффект, дисконтирование, технологический эффект, погрешность, корректировка к стандартным условиям, точность, доверительный интервал.

The introduction of such a mechanism of state-private partnership, as energy service contracts, faces in Russia with a number of difficulties. The article deals with the problems associated with verification of technological effect economic effect. Described the indicators of social effects. The description of existing methods of verification of technological effect, described the developed method. Described a comparison of the described methods. The advantage of developed native methods verification data on the example of the feasibility study for the existing object.

Key words: energy efficiency, verification methods, social effect, state function of the quality of life, economic benefits, discounting, technological effect, error correction to the standard conditions, accuracy, confidence interval.

Снижение затрат при эксплуатации и модернизации инженерного оборудования – актуальные вопросы для любой отрасли. Для предприятий, где эксплуатируется энергоёмкое устаревшее оборудование, вопрос привлечения инвестиций для переоборудования технологических процессов становится одним из важнейший. Современным решением привлечения частного капитала при гарантированном снижении энергоёмкости технологического цикла является энергосервисный контракт (ЭСКо). Общие технические, экономический и социальные аспекты и преимущества использования договоров на оказание энергосервисных услуг подробно описаны в литературе [1], [2].

Реализация энергосервисных контрактов имеет ряд сложностей [3]. Рассмотрим реальную задачу по сбережению тепловой энергии. В качестве примера рассмотрим потребление тепловой энергии зданием бассейна с известной за 5 лет статистикой (табл. 1). Здание 1954 года постройки, общая площадь 2000 кв.м., отапливаемая – 1500кв.м. Известно определённое энергосберегающее мероприятие (ЭСМ) - установка автоматизированного узла

регулирования температуры теплоносителя (АУУ), которое по прогнозам в данном здании будет экономить 12% тепловой энергии.

Таблица 1

Показатели ежемесячного потребления тепловой энергии зданием бассейна.

интервал	т.э., Гкал/мес.	интервал	т.э., Гкал/мес.	интервал	т.э., Гкал/мес.	интервал	т.э., Гкал/мес.	интервал	т.э., Гкал/мес.
01.2009	104,2	01.2010	94,7	01.2011	115,2	01.2012	86,2	01.2013	128,3
02. 2009	94,6	02. 2010	91,9	02. 2011	91,4	02. 2012	115,1	02. 2013	132,4
03. 2009	79,4	03. 2010	69,1	03. 2011	128,4	03. 2012	85,8	03. 2013	120,7
04. 2009	79,9	04. 2010	67,6	04. 2011	93,2	04. 2012	92,4	04. 2013	95,1
05. 2009	63,1	05. 2010	21,4	05. 2011	34,0	05. 2012	41,5	05. 2013	55,6
06. 2009	26,3	06. 2010	24,9	06. 2011	25,7	06. 2012	30,3	06. 2013	34,6
07. 2009	17,1	07. 2010	12,8	07. 2011	10,6	07. 2012	17,8	07. 2013	20,9
08. 2009	10,9	08. 2010	12,3	08. 2011	15,0	08. 2012	21,1	08. 2013	25,3
09. 2009	20,2	09. 2010	20,1	09. 2011	19,0	09. 2012	34,1	09. 2013	44,8
10. 2009	43,2	10. 2010	40,7	10. 2011	48,3	10. 2012	50,1	10. 2013	76,8
11. 2009	60,1	11. 2010	51,4	11. 2011	78,5	11. 2012	97,3	11. 2013	89,0
12. 2009	80,3	12. 2010	79,2	12. 2011	80,7	12. 2012	127,7	12. 2013	108,5

Реализацию ЭСМ решено осуществлять через ЭСКо, по условиям которого в пользу энергосервисной компании (ЭСК) отчисляется 90% стоимости сэкономленных энергоресурсов. Энергосервисная компания согласилась на такие условия и реализовала полный комплекс строительно-монтажных и пуско-наладочных работ до 31.12.2013г.

Требуется рассчитать экономию, полученную в результате ЭСМ за период до конца отопительного сезона 2013-2014гг.

Для решения поставленной задачи необходимо последовательно реализовать этапы расчёта:

1. Определение числа измерений, точности и достоверности исходных данных.

В качестве первичных исходных данных можно принять данные табл. 1. Исходные данные - периодические показания приборов учёта исследуемого вида энергоресурса в базовый период: $(p_1, p_2, \dots, p_n)$.

Данные могут быть преобразованы в массив ежемесячных приростов потреблённого энергоресурса $X=(x_1, x_2, \dots, x_{k-1})$, где $x_i=p_{i+1}-p_i$ и $k=n-1$. Как правило $k \leq 30$. Значения $x_i = [0; +\infty)$.

Однако система теплоснабжения здания может иметь нарушения в работе, которые вносят искажения в показания приборов учёта. Тогда общая формула нормализованной экономии [4, стр. 21]:

Нормализованная экономия =

= (базовое потребление энергетических ресурсов $\pm$

$\pm$ Стандартная корректировка к фиксированным условиям $\pm$

$\pm$ Нестандартная корректировка к фиксированным условиям) –

(1)

-(потребление энергетических ресурсов за отчетный период $\pm$

$\pm$ Стандартная корректировка к фиксированным условиям $\pm$

$\pm$ Нестандартная корректировка к фиксированным условиям).

2. К «стандартная корректировка к фиксированным условиям» относят системные (повторяющиеся) факторы, влияющие на точность исходных данных. Например, для системы отопления здания, помимо теплового потока от радиаторов отопления ($Q=k \cdot F \cdot (t_{\text{ВНУТР}} - t_{\text{НАРУЖН}})$), на температуру в здании оказывают влияние:

- 2.1. Изменение теплового режима здания как результат изменения температуры наружного воздуха;

- 2.2. трансмиссионные потери (потери тепла через стены зависят от температуры наружного воздуха);

- 2.3. нестационарность процесса трансмиссионных потерь;

- 2.4. инфильтрационные потери (воздействие ветра);
- 2.5. тепловой поток из здания через вентиляционные каналы (скорость естественно вытягиваемого воздуха возрастает с ростом разницы температур внутри и снаружи здания);
- 2.6. приток тепла от внутренних источников с различным графиком тепловыделений: оборудование, технологий, освещение, тепловыделения людей и пр.;
- 2.7. приток тепла от сторонних инженерных систем, работающих постоянно: ГВС, полотенцесушители, подогрев приточного воздуха;
- 2.8. изменение величины потерь от вент. выбросов как результат применения устройств рекуперации низкопотенциального тепла;
- 2.9. зависимость теплопотребления здания от числа посетителей бассейна, объясняемое фактом подготавливания горячей воды от ввода отопления через теплообменник;

а также:

- 2.10. дрейф погрешности прибора учёта от времени или из-за изменения показателей качества учитываемого ресурса;
- 2.11. неравномерность времени снятия показаний. Например, опоздания снятия показаний с прибора учёта на 1 сутки приводят к погрешности $= 1/30 = 3.33\%$;

Для здания бассейна принимаем наиболее значимыми и измеримыми факторы 2.1 и 2.9 (табл. 2).

3. К «нестандартной корректировке к фиксированным условиям» в общем случае можно отнести известные случаи (изменения объёма теплопотребления) от:

- 3.1. утечек;
- 3.2. аварий;
- 3.3. плановых ежегодных мероприятиях (например, уборках);
- 3.4. плановых разовых сезонных мероприятиях (заливка и освещение зимнего открытого катка);
- 3.5. остановку здания на плановый ремонт и пр.

В рассматриваемом случае принимаем факт отсутствия нестандартных корректировок за рассматриваемый исторический период.

Определение стандартных и нестандартных корректировок осуществляется аналогично.

Таблица 2.

Наиболее значимые для расчёта стандартные фиксированные корректировки.

интервал	Число посетителей, ед.	среднемес. температура, грд.С	интервал	Число посетителей, ед.	среднемес. температура, грд.С	интервал	Число посетителей, ед.	среднемес. температура, грд.С
01.2009	8 554	-5,6	09. 2010	9 898	11,42	05. 2012	10 720	15
02. 2009	11 656	-5,4	10. 2010	12 791	3,84	06. 2012	9 541	17,13
03. 2009	14 702	-0,6	11. 2010	13 575	1,66	07. 2012	9 714	20,89
04. 2009	14 334	5,1	12. 2010	12 342	-7,58	08. 2012	9 297	17,53
05. 2009	10 357	13,6	01.2011	8 554	-7,5	09. 2012	10 550	12,79
06. 2009	9 391	17,3	02. 2011	11 656	-10,59	10. 2012	13 575	6,25
07. 2009	9 778	18,8	03. 2011	14 702	-2,04	11. 2012	14 143	1,52
08. 2009	9 363	15,7	04. 2011	14 334	6,55	12. 2012	12 228	-8,41
09. 2009	10 162	13,8	05. 2011	10 357	14,59	01.2013	9 337	-7,88
10. 2009	12 973	5,8	06. 2011	9 391	19,28	02. 2013	12 363	-3,9
11. 2009	13 430	2,2	07. 2011	9 778	23,27	03. 2013	14 310	-6,48
12. 2009	12 174	-6,5	08. 2011	9 363	18,65	04. 2013	14 265	6,25
01.2010	9 416	-14,45	09. 2011	10 162	11,88	05. 2013	9 622	16,84
02. 2010	16 881	-7,53	10. 2011	12 973	6,64	06. 2013	9 402	19,74

03. 2010	15 569	-1,03	11. 2011	13 430	0,05	07. 2013	9 084	18,87
04. 2010	14 191	8,61	12. 2011	12 174	-0,14	08. 2013	7 282	18,15
05. 2010	10 695	16,7	01.2012	10 485	-7,11	09. 2013	9 195	6,66
06. 2010	9 602	18,78	02. 2012	14 973	-11,14	10. 2013	12 713	6,26
07. 2010	9 312	26,04	03. 2012	12 971	-3,11	11. 2013	12 533	3,63
08. 2010	8 009	21,58	04. 2012	15 399	8,24	12. 2013	11 759	-1,67

Приведённый в примере объём данных доступен далеко не всегда. Актуальной является задача определения минимального числа измерений ($N_{\min}$), достаточного для дальнейшего анализа. Поскольку подобная задача является задачей математической статистики, проведём краткий анализ. Дискретной (прерывной) случайной величиной называется случайная величина, которая принимает отдельные, изолированные возможные значения с определёнными вероятностями. Непрерывной случайной величиной называется случайная величина, которая может принимать все значения из некоторого конечного или бесконечного промежутка. Тогда полученный массив ежемесячный приростов показаний приборов учёта X можно однозначно классифицировать как массив непрерывных случайных величин.

Среднеарифметическое значение:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k}. \quad (2)$$

Математическим ожиданием непрерывной случайной величины X , возможные значения которой принадлежат отрезку $[0; +\infty)$, называют определённый интеграл [1, стр. 125]:

$$M(X) = \int_0^{+\infty} x * f(x) dx, \text{ где} \quad (3)$$

X – непрерывная случайная величина;

$f(x)$ – плотность распределения непрерывной случайной величины X .

Опираясь на параметр $M(X)$, для выявления типа распределения случайной величины также удобно пользоваться правилом трёх сигм. Если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина её отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения [1, стр. 135]. На практике правило в следующем виде: если распределение изучаемой непрерывной случайной величины неизвестно, но абсолютная величина отклонения превышает утроенное среднее квадратическое отклонений лишь в 0,27% случаев или меньше, то есть основание предполагать, что изучаемая величина распределена нормально; в противном случае она распределена не нормально.

Дисперсией непрерывной случайной величины называют математическое ожидание квадрата её отклонения [1, стр. 125]:

$$D(X) = \int_0^{+\infty} [x - M(X)]^2 * f(x) dx. \quad (4)$$

Поскольку выборочная дисперсия является смещённой оценкой генеральной дисперсии, то на практике при объёме выборки $k < 30$ используют исправленную дисперсию [1, стр. 212] с числом членов в знаменателе $(k-1)$. В таком случае оценка значения дисперсии [4, стр. 104]:

$$D(X) = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}{k-1}. \quad (5)$$

Среднее квадратичное отклонение непрерывной случайной величины, т.е. рассеяние случайной величины вокруг её математического ожидания [1, стр. 134], определяется равенством [1, стр. 126]:

$$\sigma(X) = \sqrt{D(X)}. \quad (6)$$

При необходимости оценить математическое ожидание с наперёд заданной точностью δ и доверительной вероятностью γ , то минимальный объём выборки, который обеспечит эту точность, вычисляемую по формуле [1, стр. 216]:

$$n_{\text{изм}} = \frac{t^2 \sigma^2}{\delta^2}, \text{ где} \quad (7)$$

t – аргумент, которому соответствует значение функции Лапласа, равное $\gamma/2$.

В случае с неизвестным значением σ генеральной совокупности используют оценку:

$$s^2 = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{X})^2}{k-1}. \quad (8)$$

Формула (7) может быть преобразована:

$$n_{\text{изм}} = \frac{t^2 s^2}{\delta^2}. \quad (9)$$

Нетрудно заметить, что (9) существенно зависит от значений ежемесячного потребляемого энергоресурса. Таким образом, минимальное число измерений существенно зависит как от качества исходных данных, так и от полноты проведённых первичных корректировок. Расчёт показывает:

$$X_{\text{Т.Э.}} = \bar{X}_{\text{Т.Э.}} \pm \hat{S}_{\text{Т.Э.}} / \sqrt{n} = 62,3 \pm 36,967 / \sqrt{60} = 62,3 \pm 4,77 \text{ Гкал/мес.} \quad (10)$$

Для анализа дальнейшего примем к рассмотрению несколько значений доверительной вероятности γ с расчётом $n_{\text{изм}}$ для каждого из них по формуле (8). Результаты для рассматриваемого примера (табл. 3) наглядно демонстрируют минимум два различных варианта измерений:

- I. 15 измерений с погрешностью 25% и доверительным интервалом 1%;
- II. 25 измерений с погрешностью 5% и доверительным интервалом 50%.

На практике Заказчику всегда предстоит решить оптимизационную задачу выбора между погрешностью измерений (чем больше погрешность, тем меньше точности в определении размера выплат по финансовой экономии) и доверительным интервалом (чем больше интервал, тем больше вероятность пропуска значимых факторов, что опять же влияет на размер возврата денежных средств не в пользу ЭСК).

Таблица 3.
Результаты расчётов $N_{\text{мин}} = f(\delta, \gamma)$

	$N_{\text{мин}} (\delta=5)$	$N_{\text{мин}} (\delta=25)$	$N_{\text{мин}} (\delta=50)$
$\gamma=0,99$ ($t=2,58$)	364	15	4
$\gamma=0,95$ ($t=1,96$)	210	8	2
$\gamma=0,90$ ($t=1,65$)	149	6	1
$\gamma=0,80$ ($t=1,29$)	91	4	1
$\gamma=0,50$ ($t=0,68$)	25	1	0

В рассматриваемом случае доп.измерений не требуется. Для определения технического эффекта необходимо воспользоваться математическим аппаратом, разработанным автором в НИУ МЭИ. Результатом расчётов являются данные, представленные на рис. 1 в виде графика и в табличном виде (табл. 4).

Рисунок 1.
Сравнение прогнозного (без ЭСМ) и фактического (с ЭСМ) теплопотребления.

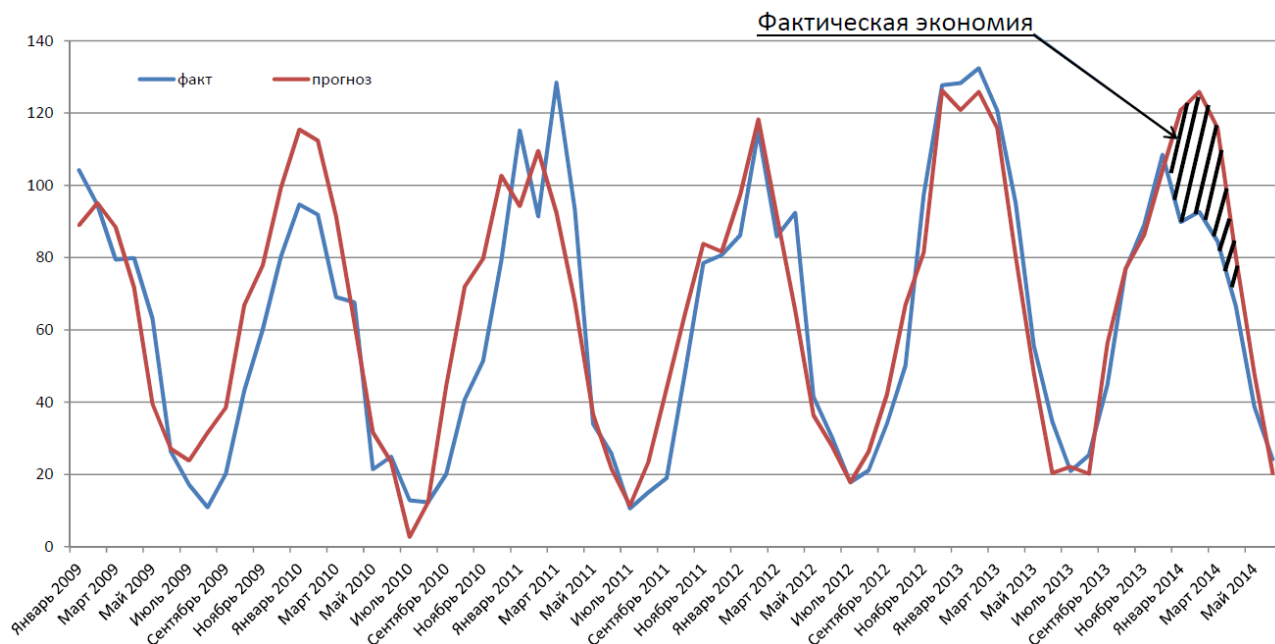


Таблица 4.
Фактические и прогнозные в сопоставимых условиях значения месячного потребления тепловой энергии.

интервал	Число посетителей, ед.	среднемес. температура, грд.С	Фактическое теплопотребление, Гкал	Прогнозное в сопоставимых условиях теплопотребление, Гкал
Январь 2014	20 337	-9,1	89,81	124,2
Февраль 2014	27 763	-2,1	92,68	120,9
Март 2014	19 810	1,52	84,49	93,6
Апрель 2014	19 765	6,34	66,57	80,1

Табличные данные легко поддаются обработке. Проведённые расчёты позволяют оценить объём сэкономленной тепловой энергии с января по апрель 2014 года включительно с погрешностью 5% и доверительным интервалом 50%:

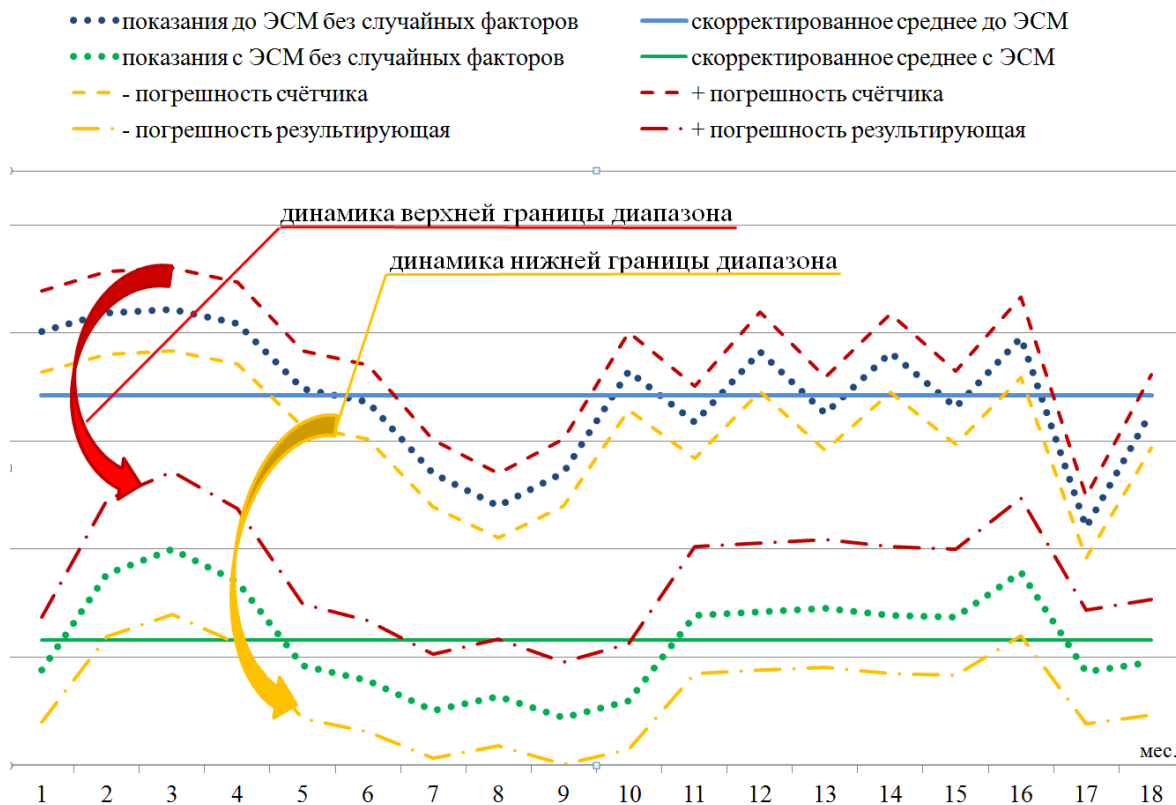
$$\Delta X_{T, \Delta} = 85,3 \pm 6,52 \text{ Гкал} \quad (11)$$

Поскольку выплаты по ЭСК осуществляются только за подтверждённый объём экономии, то расчёт позволяет говорить о двух границах диапазона экономии (рис. 2) [5]. Подтверждённая экономия соответствует нижней границе диапазона (жёлтая линия):

$$\Delta X_{T, \Delta} = 85,3 - 6,52 = 78,78 \text{ Гкал} \quad (12)$$

Рисунок 2.

Определение экономии от ЭСМ с учётом погрешностей.



Выводы:

1. Разработанный мат.аппарат позволяет с известной степенью достоверности и точности определить размер экономии от энергосберегающего мероприятия.
2. Минимальное число испытаний и минимальный уровень погрешности расчёта зависит от индивидуальных особенностей объекта и исходных данных расчёта.
3. Точность и достоверность исходных данных можно повышать путём учёта и устранения последствий случайных режимов, не повторяющихся ежемесячно.

Список литературы

1. Гужов С.В. Энергосервисные контракты и аспекты потребительского менеджмента. Энергосбережение №1, 2014.
2. Гужов С.В. Проблемы и решения информационного обеспечения повышения энергетической эффективности зданий системы образования // Информатизация и связь. №1, 2013 стр. 16-19
3. Гужов С.В. Московское образование – аспект развития инфраструктуры через заключение энергосервисных контрактов. // Энергоэффективность, Энергобезопасность, Энергонадзор. №2. МЭИ. 2013 – с. 76 – 78.
4. Международный протокол измерения и верификации эффективности. Концепция и опции для расчета объемов экономии энергетических ресурсов и воды. Том 1. Организация по оценке эффективности. EVO 10000 – 1:2010 (RU). 201 г.
5. Гужов С.В. Особенности расчёта базовой линии и верификации данных при заключении энергосервисного контракта// Энергонадзор и энергобезопасность №1-2014. стр. 65-68.