

## Анализ энерго- и ресурсопотребления муниципальных объектов с помощью методов системной динамики

Харитонов А.Ю.

Донецкий национальный технический университет,  
donetskant@yandex.ru

### *Abstract*

*Kharytonov A. "The analysis of municipal object's energy efficiency with methods of system dynamics" In the article there is the question of analysis municipal object's energy efficiency with methods of system dynamics. Presently there is not universal methodology, allowing analyzing a consumption persons, directly responsible for an energy-savings – economists and managers. Data are analyzed by method of multiplicative function. Multiplicative dependence of building's thermal consumption is got on a standard. Adequacy of this model is tested by comparing to methodology «energy-temperature» diagrams.*

Keywords: methods of system dynamics, multiplicative dependence, building's thermal consumption, energy-temperature» diagrams

### **Введение**

В настоящее время в мире происходит процесс массового накопления информации. Этому способствуют расширение областей применения информационных технологий и увеличение емкости накопителей. Появляется необходимость в обработке данных и поиске закономерностей в массивах информации. Если рассматривать данные потребления энергии и ресурсов на множестве городских объектов, то обычные методы анализа не дают качественных результатов ввиду того, что эти данные по своей природе являются стохастическими и не всегда поддаются стандартным детерминированным методам анализа энергопотребления.

Научные методы анализа энерго- и ресурсопотребления зданий довольно однообразны и в основной массе опираются на инженерные теплофизические расчеты [1]. Такие расчеты проводятся специалистами соответствующего профиля: теплотехниками, гидравликами, электротехниками и т.д. Наиболее качественный анализ данных возможен только при наличии энергетического паспорта здания и проведения энергоаудита, что является весьма дорогостоящей процедурой. Необходимо отметить, что энергетические паспорта для подавляющего большинства зданий и объектов предприятий и организаций бюджетной сферы отсутствуют.

В настоящее время практически не существует простой и универсальной методики, позволяющей анализировать потребление энергии на множестве объектов

лицами, непосредственно отвечающими за энергосбережение – хозяйственниками, эксплуатационщиками и менеджерами. Поэтому разработка новых подходов в анализе энерго- и ресурсопотребления является актуальной задачей.

### **Исходные данные**

Указом Президента Украины № 679/2008 от 28 июля 2008 года было утверждено и введено в действие Постановление «О решении Совета национальной безопасности и обороны Украины от 30 мая 2008 года «О состоянии реализации государственной политики по обеспечению эффективного использования топливно-энергетических ресурсов», в котором отражены Концептуальные направления государственной политики по обеспечению эффективного использования ресурсов и энергии. Важным элементом государственной политики энергосбережения является создание информационных систем мониторинга. В ДонНТУ в 2010 году была разработана информационная система мониторинга энергоэффективности муниципальных объектов г. Донецка, которая включает в себя:

- автоматизированное рабочее место оператора ввода данных, установленное на каждом объекте;
- систему передачи данных на сервер (наличие на объекте сети Интернет обязательно);
- программное обеспечение сбора и обработки данных, установленное на сервере в городском совете;

– непрерывно наполняющиеся базы данных различных показателей зданий всех объектов сферы образования.

На настоящее время собраны следующие данные [2]:

– административная и инженерная информация для 250 зданий 160 школ города Донецка;

– около 46 000 данных наблюдений температуры наружного воздуха и внутренней температуры зданий во время отопительных периодов 2008 – 2010 гг.;

– около 90 000 показаний суточного потребления электрической энергии;

– около 70 000 показаний суточного потребления горячей или холодной воды;

– около 47 000 показаний суточного потребления тепловой энергии (каждое показание включает температурный режим теплоносителя, суммарное и среднечасовое значение количества теплоносителя, суммарное количество потребленного тепла и тепловую мощность в период 2008 – 2010 гг.).

### **Постановка задачи исследования**

Целью работы является анализ полученных баз данных потребления энергоресурсов с использованием методов системной динамики. В процессе исследования проводилось также сравнение полученных результатов с результатами расчетов, которые выполнялись по существующим методикам, основанным на уравнениях теплового баланса зданий или балансов ресурсопотребления [5].

### **Методика анализа данных**

Методы системной динамики позволяют исследовать поведение сложных систем, опираясь на возможности компьютерного моделирования. В отличие от обычных технологий моделирования методы системной динамики не требуют построения математической модели исследуемого объекта в традиционной форме, а позволяют строить компьютерные модели системных элементов и связей между ними.

Если рассматривать энергосбережение зданий в контексте системной динамики, то задача сводится к распознаванию близких образов по определенному набору показателей для некоторого числа объектов энергопотребления. Необходимо выбрать некий эталонный объект и осуществлять ранжирование всех объектов относительно данного объекта.

Важным элементом в этом случае является выбор класса функции для моделирования. Наиболее часто в этом плане применяют мультипликативные функции.

Функция  $F(a)$  называется мультипликативной, если она удовлетворяет двум следующим условиям: эта функция определена для всех целых положительных  $a$  и не равна нулю по меньшей мере при одном таком  $a$  [3]. При этом для любых положительных взаимно простых  $a_1$  и  $a_2$  имеем:

$$F(a_1, a_2) = F(a_1) \times F(a_2). \quad (1)$$

Для построения мультипликативной функции нужны параметры зданий, которые слабо меняются с течением времени. В перечень параметров не должны входить величины, изменение которых имеет выраженный стохастичный характер.

Таковыми параметрами могут быть следующие характеристики зданий, которые контролируются при энерго- и ресурсопотреблении:

- год постройки, этажность, высота (м);
- площадь постройки (кв. м), общий объем (куб. м.);
- общая площадь (кв. м), тепловая нагрузка (Гкал/год);
- отапливаемый объем (куб. м), отапливаемая площадь (кв. м);
- паспортные температуры подачи и возврата теплоносителя на объект (°C);
- количество человек, присутствующих в здании в рабочее и нерабочее время.

Таким образом, для построения мультипликативной функции необходимо выбирать атрибутивные параметры:

- наиболее достоверные,
- независимые друг от друга;
- непосредственно влияющие на потребление выбранного ресурса.

Последующий анализ данных и оценка параметров, влияющих на потребление энергоресурсов показали, что для анализа потребления теплоэнергии необходимо учитывать год постройки здания, отапливаемую площадь и количество человек, находящихся в здании. Это позволяет построить следующую мультипликативную функцию:

$$T = a \frac{x_1}{x_{1_0}} \cdot \frac{x_2}{x_{2_0}} \cdot \frac{x_3}{x_{3_0}}, \quad (2)$$

где  $T$  – мультипликативная функция,  $a$  – некоторая постоянная,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – параметры исследуемых объектов,  $x_{i_0}$  – параметры эталонного объекта.

Для расчета мультипликативной функции нужен эталонный объект – здание, отличающееся некоторыми типовыми характеристиками. В качестве эталона может выбираться наихудшее или наилучшее здание по показателю потребления тепловой энергии, здание с наименьшей отапливаемой площадью, или здание, выбранное по другим критериям.

Таблица 1. – Расчетные значения мультипликативной функции (на примере Ворошиловского района)

Название школы	Общее количество человек	Общая площадь зданий, кв. м	Средний год построек	Объем, куб. м	Показатель Т, рассчитанный относительно школы № 9
ОШ №3	483	3176	1936	15355	22,12
Гимназия №15	299	2323,4	1952	7434,9	10,10
Гимназия №18	449	4449,3	1938	15573	28,84
УВК КОРН	280	2295	1990	6770,3	9,52
УВК №5	960	8907	1964	32265	125,13
ОШ №9	876	7749	1977	30996	100
УГК	738	3690,7	1950	40280	39,57
Лицей №22	526	3069	1939	46649	23,32
УВК №1	1194	1132	1965	30959	19,79
ОШ №13	535	3500	1961	57275	27,36
ДСФМШ №17	850	1652,9	1964	24123	20,56
ОШ №2	475	4169	1939	60040	28,61
ОШ №14	687	4049,4	1955	60741	40,52

Таблица 2. – Отношение годового потребления различных объектов к годовому потреблению эталонного объекта за выбранный базисный год (на примере Ворошиловского района)

Название школы	Фактическое потребление тепловой энергии, Гкал				Нормированное потребление тепловой энергии относительно школы № 9			
	2010 г.	2009 г.	2008 г.	2007 г.	2010 г.	2009 г.	2008 г.	2007 г.
ОШ №3	200,36	264,19	295,73	348,80	0,28	0,37	0,42	0,49
Гимназия №15	265,07	328,26	417,13	488,88	0,37	0,46	0,59	0,69
Гимназия №18	305,97	328,07	350,17	372,27	0,43	0,46	0,49	0,52
УВК КОРН	356,08	329,00	372,71	369,23	0,50	0,46	0,52	0,52
УВК №5	1135,18	810,98	1064,1	1317,3	1,60	1,14	1,50	1,85
ОШ №9	808,00	710,81	884,99	1059,7	1,14	1,00	1,25	1,49
УГК	930,00	930,00	1095,1	1150,2	1,31	1,31	1,54	1,62
Лицей №22	422,45	481,92	498,51	374,11	0,59	0,68	0,70	0,53
УВК №1	431,91	628,60	656,10	796,39	0,61	0,88	0,92	1,12
ОШ №13	397,66	347,43	398,25	381,70	0,56	0,49	0,56	0,54
ДСФМШ №17	562,46	479,04	480,14	383,76	0,79	0,67	0,68	0,54
ОШ №2	374,49	409,30	481,94	355,39	0,53	0,58	0,68	0,50
ОШ №14	453,26	425,13	490,32	376,43	0,64	0,60	0,69	0,53
ДОШ 19	457,77	490,00	610,00	248,36	0,64	0,69	0,86	0,35
ДОШ 56	474,22	330,00	200,00	60,52	0,67	0,46	0,28	0,09
ДОШ 117	279,10	390,00	450,00	543,93	0,39	0,55	0,63	0,77

Для проведения анализа в качестве эталонного объекта была выбрана школа № 9 Ворошиловского района, характеризующаяся высоким удельным потреблением тепловой энергии. Таким образом, мультипликативная функция для анализа ресурсо- и энергопотребления будет иметь следующий вид (табл. 1):

$$T = 100\% \cdot \frac{Q_x \cdot P_x \cdot G_x}{Q_9 \cdot P_9 \cdot G_9}, \quad (3)$$

где  $T$  – мультипликативная функция,  $Q_x, P_x, G_x$  – количество находящихся в здании человек, площадь всех отапливаемых

помещений и год постройки каждого исследуемого здания соответственно,  $Q_9, P_9, G_9$  – соответственно параметры эталонного объекта.

#### Оценка потребления энергоресурсов

Для анализа динамики изменений параметров берутся годовые интервалы потребления энергии и ресурсов. Предполагается, что выбранные для мультипликативной функции показатели не меняются в исследуемом промежутке.

Для каждого года и для каждого ресурса строится эмпирический показатель  $t$  (табл. 2), определяющий отношение годового потребления различных объектов к годовому потреблению эталонного объема этого же ресурса за выбранный базисный год:

$$t = \frac{P_x}{P_y}, \quad (4)$$

где  $t$  – показатель удельного потребления;  $P_x$  – потребление ресурса за определенный год анализируемым объектом;  $P_y$  – потребление ресурса за базисный год эталонным объектом.

Отношения полученных результатов параметров  $T$  и  $t$  называются нормированным потреблением. Диаграммы рассеяния нормированного потребления представлены на рисунке 1.

Полученная модель потребления тепловой энергии от показателей объектов (количество человек, площадь и год постройки) позволяет определять состояние объекта по факту потребления тепловой энергии. Однако при этом остается вопрос оптимальности выбора атрибутивных показателей объектов и эталона для анализа.

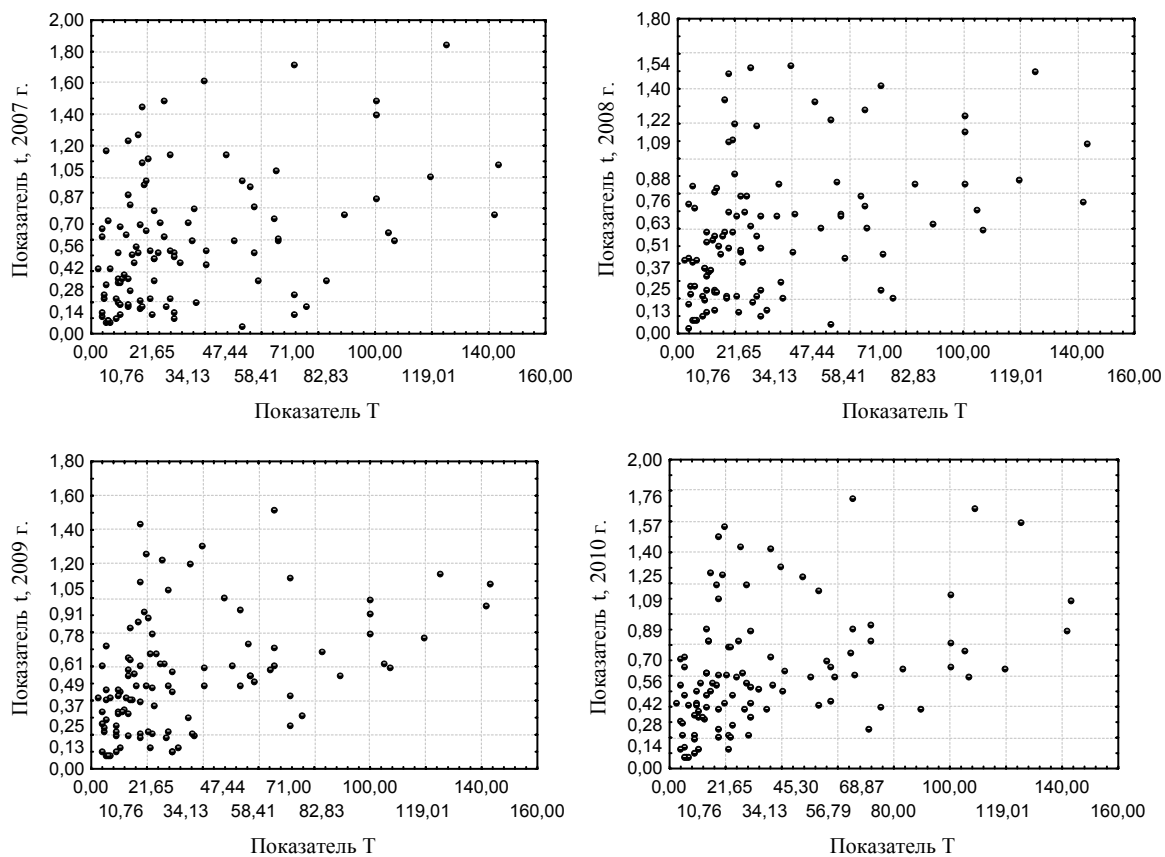


Рисунок 1. – Распределения показателей нормированного потребления тепловой энергии относительно потребления тепловой энергии здания школы № 9

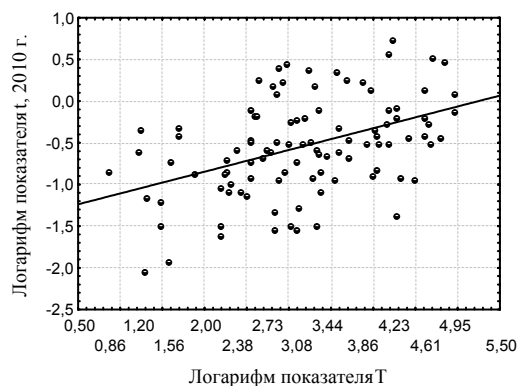


Рисунок 2. – Распределения натурального логарифма показателей нормированного потребления относительно натурального логарифма потребления тепловой энергии здания школы № 9, 2010 г.

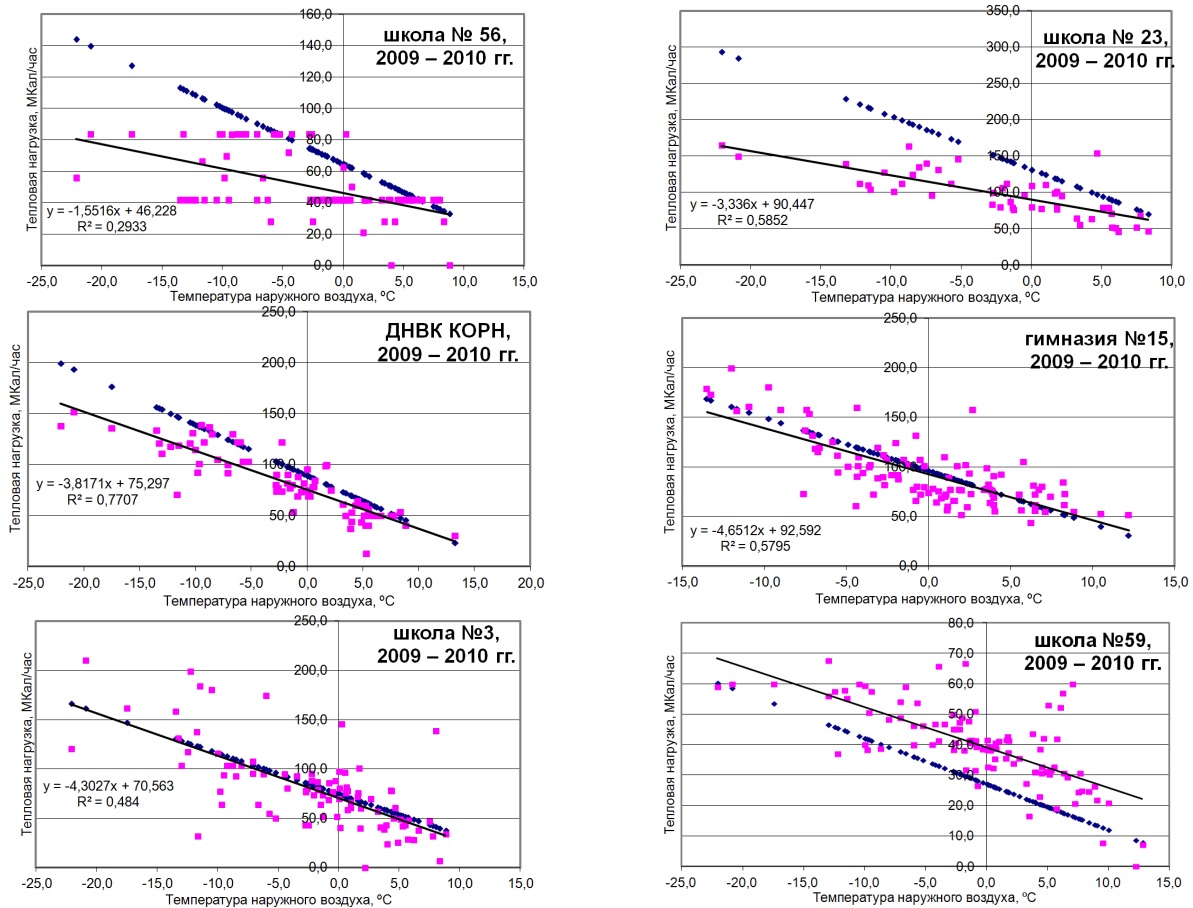


Рисунок 3. – Анализ тепловой нагрузки от температуры окружающей среды зданий:

- ◆ – зависимость необходимой среднесуточной тепловой нагрузки (Мкал/час) от температуры окружающей среды (расчетная ЭТ-кривая);
- – зависимость потребляемой зданием среднесуточной тепловой нагрузки (Мкал/час) от температуры окружающей среды;
- – усредненная линия зависимости потребляемой зданием среднесуточной тепловой нагрузки от температуры окружающей среды (действительная ЭТ-кривая)

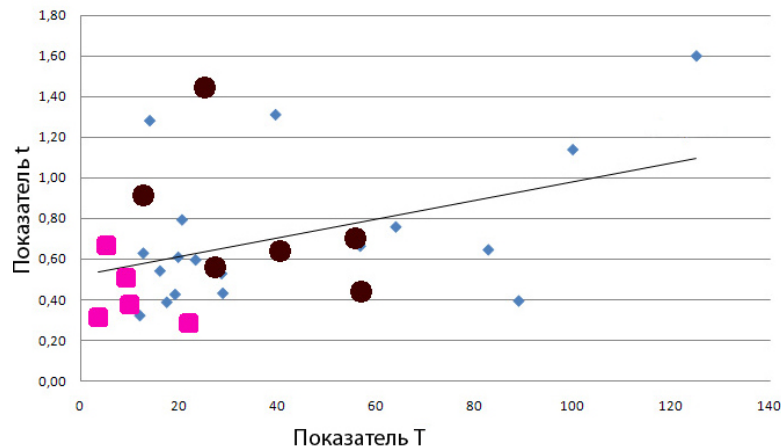


Рисунок 4. – Распределение нормированного тепла объектов Киевского и Ворошиловского районов с выделением отдельно объектов с положительной и отрицательной разницей необходимой и потребляемой среднесуточных тепловых нагрузок:

- – объекты с положительной разницей необходимой и потребляемой среднесуточных тепловых нагрузок (школы №№ 53, 61, 2, 14, 70, 54);
- – объекты с отрицательной разницей необходимой и потребляемой среднесуточных тепловых нагрузок (школы №№ 56, 23, 15, 3)

При проведенні аналізу потреби енергоресурсів необхідно перевірити отримані залежності на лінійність (рис. 2). Для цього необхідно побудувати лінійну функцію виду:

$$\ln(t) = A + B \cdot \ln(T), \quad (5)$$

де  $A, B$  – коефіцієнти залежності.

Із рисунка 2 видно, що логарифмічне співвідношення має виражену лінійну залежність.

При аналізі графіків розподілу показувачів нормованого споживання теплової енергії відносно споживання теплової енергії еталонного будинку за кожен рік (рис. 1) видно, що отримані коефіцієнти стабільні в часі. Динаміка змін коефіцієнтів подібна динаміці змін середньорічної температури навколишнього середовища, що свідчить про незалежність від внутрішніх нестабільних факторів збереження тепла.

### **Проверка работоспособности модели**

Для перевірки працездатності моделі застосуємо її до аналізу теплового споживання об'єктів бюджетної сфери. Для аналізу цих об'єктів застосуємо методику побудови діаграм «енергія-температура» дійсної теплової навантаження і необхідної теплової навантаження, розрахованої згідно з рівняннями теплового балансу на основі реальних даних. Детальніше про цю методику можна прочитати в [1]. Для аналізу були обрані об'єкти, які мають достатню кількість даних для аналізу. Розподілу теплової навантаження від температури навколишнього середовища цих об'єктів представлено на рисунку 3.

Як видно з графіків, наведених вище, різниця необхідної і споживаної середньодобових теплових навантажень показує відхилення в подачі теплової енергії різними будинками в більшу або меншу сторону. Згідно з даними, надаваними підприємствами-постачальниками теплової енергії, тепло подається в усі школи згідно з температурними графіками, тому цим показувачем прийнято визначати теплові втрати будинків. Визначимо місце розглянутих вище шкіл в розподілі нормованого тепла (рис. 4), залишивши в розподілі тільки об'єкти Київського і Ворошиловського районів, і виділив окремо об'єкти з позитивною і негативною різницею необхідної і споживаної середньодобових теплових навантажень.

Отримане розподілення показує зв'язок розподілення нормованого тепла від розрахунку даних за методикою побудови діаграм «енергія-температура», що доводить працездатність моделі.

### **Выводы**

По результатам роботи автоматизованої інформаційної системи моніторингу енергоефективності муніципальних об'єктів м. Донецька була накоплена база даних показувачів споживання енергії і ресурсів. Дані проаналізовані за допомогою теорії мультиплікативних функцій. Отримана залежність теплового споживання об'єктів будинків від еталонного об'єкта. Адекватність роботи даної моделі перевірена шляхом порівняння її з методикою діаграм «енергія-температура».

Отримана мультиплікативна залежність дозволяє перевести базу даних показувачів споживання енергії і ресурсів в базу моделей з значеннями споживання і параметрами рівняння лінійної залежності натуральних логарифмів показувачів мультиплікативної функції. В свою чергу, це дозволяє проводити аналіз споживання енергії і ресурсів, використовуючи тільки дані споживання і не включаючи в аналіз статичні дані і параметри об'єктів.

### **Литература**

1. Козин В.Е., Левина Т.А. и др. Теплоснабжение: Уч. пос. – М.: Вс. шк., 1980. – 408 с.
2. Лукьянченко А.А., Гришин Г.А., Сафьянц С.М. и др. Комплексная программа "Энергосбережение в г. Донецке на 2010 – 2014 гг." – Донецк: ЧП "Вик", 2010 – 188 с.
3. Оразов М. О некоторых задачах теории мультипликативных функций / М. Оразов // Молодой ученый. – М.: Наука, — 2011. – 165 с.
4. Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Аверин Е.Г. Методы системной динамики при анализе социально-экономического развития стран и регионов // САИТ-2011. Выпуск 1 – Донецк: ДонНТУ, – 2011. – С. 108 – 122.
5. Карпушев С.А., Харитонов А.Ю. Автоматизированная система мониторинга энергоэффективности муниципальных объектов г. Донецка / А.Ю. Харитонов // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист/ Інститут навколишнього середовища НАН та МНС України. Київ-Кременчук – 2010. – №1. – С. 55 – 67.