

ных компьютерных технологий для анализа тепловых режимов и оптимизации параметров электрокабельной системы отопления // *Экологія і ресурси*. – 2003. – № 6. – С. 181-186.

14. *ДБН В.2.5.-24-2003*. “Електрична кабельна система опалення”. – К.: Держбуд України, 2004. – 31 с.

15. *ДБН В.2.5.-23-2003*. Проектування енергообладнання об'єктів цивільного призначення. – К.: Держбуд України, 2004. – 131 с.

16. *Статистичний щорічник України за 2004*. – К.: Консультант, 2005. – 588 с.

17. *ДНАОП 0.00-1.32-01*. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – К.: Укрархбудінформ, 2001. – С. 109-113.

18. *Розинський Д.Й., Тимченко М.П.* Економічний аспект впровадження у житлово-кому-

нальне господарство (ЖКГ) України електротехнологій опалення на базі ЕКСО // *Будівництво України*. – 2006, № 2. – 10-15.

19. *Ватагин М.* Все засекретим, а потом ... Энергетическая политика Украины // 2005. – № 11, С. 52-58.

20. *Ватагин М.* Учитывать ли уран в энергетическом балансе? // Энергетическая политика Украины. – 2005. – № 12. – С. 36-41.

21. *Баталов А., Салимон В.* Баланс интересов. О проблеме дефицита высокоманевренных регулирующих мощностей в ОЭС Украины // Энергетическая политика Украины. – 2004. – № 6. – С.54-57.

Получено 22.01.2007 г.

**Замечания
редакционной коллегии журнала
“Промышленная теплотехника”**

Вопросы, рассматриваемые в статье, представляют интерес в практическом и научном отношениях, и поэтому редакция сочла необходимым опубликовать статью. Вместе с тем редакция не может согласиться со всеми приведенными положениями и выводами.

Нельзя согласиться с тем, что в Украине в качестве основного энергоносителя при отоплении и горячем водоснабжении в ЖКХ и АПК может служить электроэнергия.

По нашему мнению, теплоснабжение в ЖКХ и АПК должно основываться на индивидуальных отопительных котельных установках, КПД которых не ниже 90%. В перспективе энергоснабжение коммунально-бытового сектора должно обеспечиваться установкой мини-ТЭС с подключением когенерационной системы.

Такие рекомендации особо перспективны с учетом существенного повышения стоимости газа и электроэнергии в нашей стране.

Электротеплоаккумуляционное отопление и горячее водоснабжение применимо в тех районах, где электроэнергия, вырабатываемая атомными станциями, по локальным условиям не может быть использована в полной мере.

УДК 622.997:697.34

Шишкин Н.Д.

Астраханский государственный технический университет

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ

Розроблено теоретичні основи проектування автоматичних теплоенерге-

Разработаны теоретические основы проектирования автономных тепло-

Theoretical bases of designing of independent heat power complexes are devel-

тичных комплексов. Зроблено енергетичний, ексергетичний та економічний аналізи комплексного використання різних джерел енергії з відновлюваними джерелами енергії включно. Енергетичний ККД енергокомплексів при наявності у них відновлюваних джерел не нижчий, ніж при використанні паливно-енергетичних ресурсів, а ексергетичний ККД істотно вищий. Оптимальні варіанти автономних теплоенергетичних комплексів з оригінальними типами трансформаторів та акумуляторів відновлювальних джерел енергії за техніко-економічними показниками конкурентоспроможні з системами енергопостачання, які використовують паливно-енергетичні ресурси.

энергетических комплексов. Выполнен энергетический, эксергетический и экономический анализ комплексного использования различных источников энергии, включая возобновляемые источники энергии. Энергетический КПД энергокомплексов при наличии в них возобновляемых источников не ниже, чем при использовании топливно-энергетических ресурсов, а эксергетический КПД существенно выше. Оптимальные варианты автономных теплоэнергетических комплексов с оригинальными типами трансформаторов и аккумуляторов возобновляемых источников энергии по технико-экономическим показателям конкурентоспособны с системами энергоснабжения, использующими топливно-энергетические ресурсы.

oped. It is executed power, exergy and the economic analysis of complex use of various energy sources, including renewed energy sources. Power efficiency of energy complexes at presence in them is not lower than renewed resources, than at use of fuel and energy resources, and exergy efficiency is essentially higher. Optimum variants of independent heat power complexes with original types of transformers and accumulators of renewed energy sources on technical and economic parameters are competitive with the systems of power supply using fuel and energy resources.

C – себестоимость;
K – капитальное вложение;
t, T – температура;
V – объем;
 α – доля теплоты, получаемой от топливного источника теплоты первым потребителем;
 β – отношение тепловой производительности каждого низкопотенциального энергоисточника к тепловой производительности топливного источника теплоты
 η – коэффициент полезного действия (энергетический);
 θ – эксергетическая температура;
 ψ – коэффициент, учитывающих вклад каждого из источников (видов) энергии в преобразование, аккумулирование и передачу энергии;
 АТК – автономный теплоэнергетический комплекс;
 БН – биогазовый нагреватель;
 БГУ – биогазовая установка;
 ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
 ВЭР – вторичные энергоресурсы;
 ВЭУ – ветроэнергетическая установка;
 ГН – газовый нагреватель;
 ГГТМГ – гелиоустановка гравитационного типа с многоступенчатым гелиоколлектором;
 ГУ – гелиоустановка;
 ИНТ – источники низкопотенциальной теплоты;
 КСЭ – коллектор солнечной энергии;
 МВТГ – механический ветротеплогенератор;
 МТ – механически теплогенератор;
 ПССО – пассивная система солнечного отопления;
 СГВ – система горячего водоснабжения;

СН – солнечный нагреватель;
 ССГВ – солнечная система горячего водоснабжения;
 СО – система отопления;
 ТАМФП – теплоаккумулирующий материал фазового перехода;
 ТА – тепловой аккумулятор;
 ТН – тепловой насос;
 ТЭР – топливно-энергетические ресурсы;
 УТ – утилизатор теплоты.
Индексы верхние:
MAX – максимальное значение;
ex – эксергетический, эксергетическая;
T – относящиеся к трансформаторам энергии;
A – относящиеся к аккумуляторам энергии;
Э – относящиеся к энергопроводам;
x – для холодной воды, подаваемой в смесители системы горячего водоснабжения.
Индексы нижние:
a – текущее количество трансформаторов энергии;
b – текущее количество аккумуляторов энергии;
c – текущее количество энергопроводов;
i – для низкопотенциальных энергоисточников, подающих тепло первому потребителю;
j – для низкопотенциальных энергоисточников, подающих тепло второму потребителю;
m – количество видов ТЭР;
n – количество видов ВИЭ;
p – количество видов ВЭР;
ГН – для газовых водонагревателей
П1 – для потерь в тепропроводах соединяющих топливный источник теплоты с первым потребителем;

П1 – для потерь в теплопроводах, соединяющих топливный источник теплоты со вторым потребителем;

СГВ – для систем горячего водоснабжения;

СО – для систем отопления;

T – для топливного источника теплоты;

УТ – для утилизаторов теплоты.

В настоящее время в мире потребляется огромное количество первичной энергии (15 млрд т у. т. в год), в том числе в России 1,5 млрд т у. т. в год, причем около 40 % этой энергии используется в системах теплоснабжения. Запасы топливных энергоресурсов (природного газа, нефти, угля) ограничены. После энергетического кризиса 1970-х годов большие надежды стали возлагаться на низкопотенциальные ВИЭ и ВЭР.

В 1994 году Минэнерго Российской Федерации была разработана концепция использования возможностей малой и нетрадиционной энергетики. В ней была сформулирована задача существенного увеличения доли низкопотенциальных источников и ВИЭ в энергобалансе России. Эта задача особенно актуальна для объектов в сельской местности, в пустынных, горных и северных регионах страны, удаленных от централизованных систем теплоснабжения, т. е. в АТК. Однако, как следует из ряда публикаций последних лет, применение ВИЭ сдерживается рядом факторов, к числу которых относятся недостаточно высокие показатели эффективности преобразования и аккумулирования ВИЭ, а также высокие удельные капитальные затраты на трансформаторы и аккумуляторы ВИЭ [1-4, 9]. Кроме того, эффективное использование ВИЭ в АТК связано с большими трудностями, в том числе и потому, что слабо разработаны методы оценки их теплотехнической эффективности и оптимального комбинирования различных энергоисточников.

Таким образом, весьма актуальными представляются создание высокоэффективных трансформаторов ВИЭ и эффективное использование их в АТК. Поэтому необходима разработка новых технологий и технических решений, существенно улучшающих энергетические и технико-экономические показатели ГУ, ВЭУ и БГУ, а также создание методов оценки и оптимизации комплексного использования различных источников энергии в АТК,

На основе теоретических и экспериментальных исследований автором разработан ряд оригинальных типов трансформаторов и аккумуляторов ВИЭ. В частности, в активных гелиосистемах могут быть использованы ГГТМГ из разнородных элементов и тепловые аккумуляторы с ТАМФП, для преобразования энергии ветра в электрическую и тепловую энергию – МВТГ, ВЛНА, для получения биогаза БГУ с использованием ГУ, ВЭУ и ТН для подогрева биомассы [5, 6, 8].

Для сравнительной оценки энергетического КПД различных типов трансформаторов, аккумуляторов, энергопроводов и энергоустановок в качестве ВИЭ могут быть использованы данные, приведенные в табл. 1.

Как видно из табл. 1, КПД ряда оригинальных агрегатов, таких как ВЛНА, биоэнергетических установок с применением для подогрева ГУ и ВЭУ, значительно выше, чем у известных аналогов.

На основе анализа энергопотоков в АТК автором получена общая формула для расчета энергетического КПД АТК, зависящего от КПД трансформаторов, аккумуляторов, энергопроводов и коэффициентов, учитывающих вклад каждого из источников (видов) энергии в преобразование, аккумулирование и передачу энергии [7]

$$\eta_{АТК} = \sum_{a=1}^{a=m+n+p} \psi_a \eta_a^T \sum_{b=1}^{b=r} \psi_b \eta_b^A \sum_{c=1}^{c=s} \psi_c \eta_c^Э . \quad (1)$$

Расчеты по формуле (1) показали, что КПД АТК при наличии в них ВИЭ не ниже, чем при использовании ТЭР. За счет применения ВЭР КПД АТК может дополнительно повыситься на 20...30 %.

Для оценки термодинамической эффективности АТК введен эксергетический КПД АТК, показывающий эффективность использования эксергии теплоты и выражающий соотношение между суммарной эксергией теплоты, поступающей потребителям, и эксергией теплоты источников. В частности, при наличии топливного источника теплоты, нескольких источников теплоты, использующих ВИЭ и ВЭР, а также двух потребителей теплоты эксергетический КПД

Табл. 1. Значения КПД трансформаторов, аккумуляторов, энергопроводов и энергоустановок

№	Тип установки или агрегата	$\eta_{ТЭ}$	$\eta_{АЭ}$	$\eta_{ЭП}$	$\eta_{ЭУ}$
	<i>Установки, использующие ВИЭ</i>				
1	Гелиоустановки:				
1.1	с коллекторами из элементов НПК	0,27...0,39	0,92...0,98	0,80...0,90	0,20...0,34
1.2	с коллекторами из элементов НПК-1	0,51...0,58	0,92...0,98	0,80...0,90	0,37...0,51
1.3	с коллекторами из элементов НПК-2	0,61...0,67	0,92...0,98	0,80...0,90	0,45...0,59
1.4	с многоступенчатыми КСЭ (ГГТМГ)	0,53...0,63	0,92...0,98	0,90...0,95	0,44...0,59
2	Ветроэнергоустановки:				
2.1	аксиальные	0,32...0,45	0,70...0,80	0,98...0,99	0,22...0,36
2.2	ортогональные с ротором Дарье	0,38...0,45	0,70...0,80	0,98...0,99	0,26...0,36
2.3	ортогональные с ротором Савониуса	0,15...0,20	0,70...0,80	0,98...0,99	0,10...0,16
2.4	ВЛНА	0,72...0,82	0,70...0,80	0,98...0,99	0,49...0,65
3	Биоэнергетические установки:				
3.1	с применением биогаза на подогрев	0,40...0,60	0,95...0,98	1,00	0,38...0,59
3.2	с применением ГУ	0,75...0,80	0,95...0,98	1,00	0,71...0,78
3.3	с применением ВЭУ	0,85...0,90	0,95...0,98	1,00	0,81...0,88
	<i>Агрегаты, использующие ТЭР</i>				
4	Газовый водонагреватель	0,55...0,65	1,00	1,00	0,55...0,65
5	Автоматизированный газовый модуль	0,83...1,02	1,00	0,90...0,95	0,75...0,97
	<i>Установки, использующие ВЭР</i>				
6	Утилизаторы теплоты сточных вод	0,50...0,60	0,80...0,90	0,80...0,90	0,32...0,49
7	Утилизаторы теплоты вентиляционных выбросов	0,60...0,70	1,00	0,80...0,90	0,48...0,63

различных вариантов АТК может быть определен по формуле

$$\eta_{1-m-n}^{ex} = \left(\alpha \eta_T \eta_{П1} + \sum_{i=1}^m \beta_i \eta_{П1i} \right) \theta_{П1} + \left[(1-\alpha) \eta_T \eta_{П2} + \sum_{j=m+1}^n \beta_j \eta_{П2} \right] \theta_{П2} / \left(\theta_T^{MAX} \sum_{i=1}^m \beta_i \theta_i + \sum_{j=m+1}^n \beta_j \theta_j \right). \quad (2)$$

По формуле (2) выполнена оценка энергетического КПД для 30-ти вариантов комбинирования от двух до пяти источников теплоты в АТК (табл. 1). Для использования ТЭР в АТК могут быть применены газовые нагреватели (ГН), для использования ВЭР – утилизаторы тепла (УТ) сточных вод и вентиляционных выбросов, для использования ВИЭ – солнечные нагреватели

(СН), ветротеплогенераторы (ВТ) и биогазовые нагреватели (БН) биоэнергетических установок, а также тепловые насосы (ТН), использующие природные и техногенные источники низкопотенциальной теплоты. В качестве потребителей тепловой энергии принимаются системы отопления (СО) и системы горячего водоснабжения (СГВ) с различной температурой поступающих в них теплоносителей.

Эксергетические температуры теплоносителя, поступающего потребителям, и максимальные эксергетические температуры дымовых газов и теплоносителя в УТ определялись по формулам

$$\theta_{CO} = 1 - T / T_{CO}, \quad \theta_{СГВ} = 1 - T / T_{СГВ}, \quad \theta_{СГВ}^X = 1 - T / T_{СГВ}^X, \\ \theta_{ГН}^{MAX} = 1 - T / T_{ГН}^{MAX}, \quad \theta_{УТ}^{MAX} = 1 - T / T_{УТ}^{MAX}. \quad (3)$$

В расчетах по формулам (2) и (3) принимались: $T_{CO} = 313...363$ К, $T_{СГВ} = 313...363$ К,

Табл. 2. Варианты комбинирования нескольких источников теплоты в АТК

Обозначения вариантов	Топливные и вторичные энергоисточники			Возобновляемые источники энергии		
	ГН	УТ	ТН	БН	СН	ВТ
2 энергоисточника						
1-2	ГН	УТ				
1-3	ГН		ТН			
1-5	ГН				СН	
1-6	ГН					ВТ
2-4		УТ		БН		
3-4			ТН	БН		
4-5				БН	СН	
4-6				БН		ВТ
3 энергоисточника						
1-2-3	ГН	УТ	ТН			
1-2-5	ГН	УТ			СН	
1-2-6	ГН	УТ				ВТ
1-3-5	ГН		ТН		СН	
1-3-6	ГН		ТН			ВТ
1-5-6	ГН				СН	ВТ
2-3-4		УТ	ТН	БН		
2-4-5		УТ		БН	СН	
2-4-6		УТ		БН		ВТ
3-4-5			ТН	БН	СН	
3-4-6			ТН	БН		ВТ
4-5-6				БН	СН	ВТ
4 энергоисточника						
1-2-3-5	ГН	УТ	ТН		СН	
1-2-3-6	ГН	УТ	ТН			ВТ
1-2-5-6	ГН	УТ			СН	ВТ
1-3-5-6	ГН		ТН		СН	ВТ
2-3-4-5			ТН	БН	СН	
2-3-4-6			ТН	БН		ВТ
2-4-5-6				БН	СН	ВТ
3-4-5-6			ТН	БН	СН	ВТ
5 энергоисточников						
1-2-3-5-6	ГН	УТ	ТН		СН	ВТ
2-3-4-5-6		УТ	ТН	БН	СН	ВТ

$T_{СГВ}^X = 298 \text{ К}$, $T_{ГН}^{MAX} = 2000 \text{ К}$, $T_{УТ}^{MAX} = 303 \text{ К}$. Анализ эксергетического КПД АТК по каждому из 30-ти вариантов комбинирования производился по группам вариантов АТК с двумя, тремя, четырьмя и пятью источниками теплоты. Наи-

менее эффективным представляется вариант АТК с одним топливным источником энергии (ГН или БН), которому соответствует значение эксергетического КПД 0,20 при максимальных температурах $t_{CO} = t_{СГВ} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Наиболее эффек-

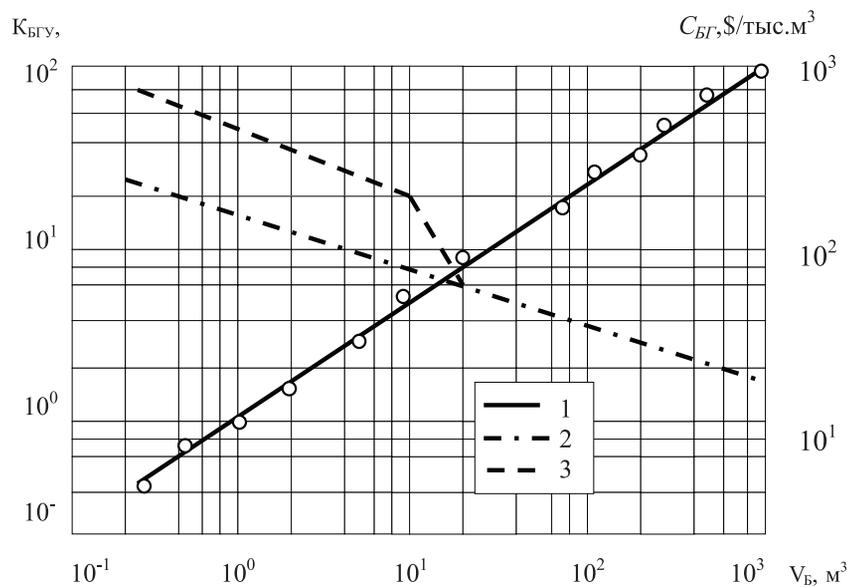


Рис. 1. Зависимость технико-экономических параметров БГУ от объема биореактора:
1 — капитальные вложения; 2 — себестоимость биогаза при периодической загрузке биомассы;
3 — себестоимость биогаза при однократной за цикл сбраживания загрузке биомассы.

тивными представляются варианты 1-2-3-5 (ГН-ТН-СН-ВТ) и 2-3-4-5 (БН-ТН-СН-ВТ), имеющие значения $\eta_{1-m-n}^{ex} = 0,36$, в 1,8 раза превышающие значение эксергетического КПД АТК с топливным источником теплоты. Эти варианты при равных прочих значениях параметров отличаются наибольшими значениями суммарного коэффициента $\beta_{НИЭ} = 1,2$, которому соответствует коэффициент замещения общей нагрузки АТК за счет ВИЭ и ВЭР $\psi_{НИЭ} = \beta_{НИЭ} / (1 + \beta_{НИЭ}) = 0,55$. Таким образом, термодинамически наиболее эффективны АТК с ВИЭ и ВЭР. Предпочтение следует отдавать вариантам с тремя-пятью источниками энергии. Термодинамически наиболее эффективные варианты АТК с ВИЭ требуют их дальнейшей технико-экономической оптимизации для поиска оптимального для данного потребителя варианта АТК, соответствующего минимальным приведенным годовым затратам.

Автором были рассмотрены основные факторы, от которых зависят ТЭП ГУ, ВЭУ и БГУ: капитальные вложения, приведенные годовые затраты, срок окупаемости и себестоимость получаемой тепловой энергии. Применение оригинальных ГТТМГ [6] с тепловыми аккумуляторами, в которых используются ТАМФП [8], позволяет практически в 2 раза уменьшить затраты на гелиоуста-

новки в целом. Себестоимость получаемой в них тепловой энергии в 2 раза меньше себестоимости тепловой энергии, получаемой от газовых водонагревателей, работающих на природном газе.

Получены формулы для расчета удельных капитальных вложений на 1 кВт установленной мощности и удельных затрат на 1 кВт·ч получаемой тепловой энергии и срока окупаемости ВЭУ. Применение ортогональных МВТГ позволяет в 1,3 раза сократить себестоимость тепловой энергии, получаемой из ветровой, а применение ВЛНА позволяет уменьшить себестоимость генерируемой тепловой и электрической энергии в 1,8...1,9 раза [5].

Обобщение литературных данных показало, что капитальные вложения на БГУ увеличиваются пропорционально объему биореактора в степени 0,67 (рис. 1). Получены полуэмпирические формулы для расчета себестоимости получаемого биогаза. Результаты расчетов показали, что себестоимость получаемого биогаза уменьшается пропорционально объему биореактора в степени $-0,33$ (рис.1). Более высокая себестоимость (в 2,5...3,0 раза) для малых БГУ может быть при применении однократной за цикл сбраживания загрузкой органических веществ в биореактор, а не периодической (не реже 1 раза в сутки) с загрузкой $0,10...0,15 \text{ м}^3$ биомассы/сут.м³ биореактора, имеющим место в

БГУ средней и большой мощности. Себестоимость биогаза, вырабатываемого БГУ средней и большой мощности, $C_{БГ} = 14...61\$/\text{ тыс. м}^3$ не превышает цены на природный газ на внутреннем российском рынке и существенно ниже цены на природный газ на внешнем рынке, достигающей $95...250\$/\text{ тыс. м}^3$. Применение для подогрева биомассы ГУ, ВЭУ и ВЭУ в сочетании с ТН [5] позволит существенно уменьшить потребление биогаза на собственные нужды и снизить себестоимость получаемого биогаза до $C_{БГ} = 33...109\$/\text{ тыс. м}^3$ для БГУ малой мощности. С учетом больших капитальных вложений на строительство газовых сетей и получения дополнительной прибыли за счет получаемых удобрений, использование БГУ не только большой и средней, но и малой мощности с объемом биореактора до 10 м^3 может быть экономически оправданным для теплогазоснабжения многих типов потребителей в сельской местности во многих регионах России, Украины и Беларуси.

Сопоставление ТЭП нескольких вариантов АТК с ВИЭ позволяет выбрать оптимальный вариант с минимальными суммарными годовыми издержками, меньшими, чем в АТК с ТЭР. Оптимальные варианты АТК с предлагаемыми автором высокоэффективными трансформаторами и аккумуляторами ВИЭ по технико-экономическим показателям конкурентоспособны с централизованными и автономными системами энергоснабжения, использующими ТЭР. Их применение вполне эффективно в настоящее время и станет еще более эффективным в ближайшие несколько лет, учитывая тенденцию постоянного роста цен на ТЭР. Учет дополнительной экономии за счет снижения ущерба окружающей среде улучшает ТЭП АТК с ВИЭ. Их применение становится еще более экономически эффективным.

Выводы

Таким образом, полученные результаты обеспечивают комбинирование и эффективное использование источников тепловой энергии в АТК путем реализации новых высокоэффективных типов трансформаторов и аккумуляторов ВИЭ, схемных решений и практических рекомендаций для различных типов потребителей. Оптимальные вари-

анты АТК с ВИЭ, имеющие более высокие технико-экономические показатели, чем АТК с ТЭР, смогут найти достаточно широкое применение на различных объектах, удаленных от централизованных систем теплоснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амерханов Р.А.* Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых источников энергии. – М.: Колос, 2003. – 532 с.
2. *Мхитарян Н.М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Опыт и перспективы. – К.: Наук. думка, 1999. – 320 с.
3. *Васильев Ю.С., Хрисанов Н.И.* Экология использования возобновляемых энергоисточников. Л.: Изд-во ЛГУ, 1991. – 343 с.
4. *Бутузов В.А.* Анализ опыта разработки и эксплуатации гелиоустановок, геотермальных систем теплоснабжения в Краснодарском крае // Международная школа-семинар ЮНЕСКО “Использование возобновляемых источников энергии в Черноморском регионе. Стратегия и проблемы образования” 11-15 марта 2002 г., г. Сочи. – М.: 2002. – С. 48-74.
5. *Шишкин Н.Д.* Малые энергоэкономичные комплексы с возобновляемыми источниками энергии. – М.: – Готика, 2000. 236 с.
6. *Шишкин Н.Д.* Гелиоустановка. Описание изобретения к патенту РФ № 2124680. - М.: РАПТЗ. 1999. – 4 с.
7. *Ильин А.К., Шишкин Н.Д.* Автономные теплоэнергетические комплексы (структура, характеристики, эффективность). Ростов-на-Дону: Южный научный центр РАН, 2004. – 112 с.
8. *Шишкин Н.Д., Цымбалюк Ю.В.* Фазопереходные тепловые аккумуляторы с высокотеплопроводными инклузивами. Астрахань: Саратовский научный центр РАН. Отдел энергетических проблем. Лаборатория нетрадиционной энергетики, 2006. – 120 с.
9. *Harder E.L.* Fundamentals of energy production. N.-Y.: Interscience publication. J. Wiley & Sons, 1982. – 358 p.

Получено 22.01.2007 г.