

УДК 620.92:504.06

**Л.П.Клименко**, докт.техн.наук, **Н.А.Воскобойникова**, канд.техн.наук (Черноморский государственный университет имени Петра Могилы, Николаев)

## **Повышение уровня экологической безопасности теплохладоснабжения зданий путем сбалансированного использования альтернативных и традиционных источников энергии**

*Разработан метод комплексной оценки экологической безопасности систем теплохладоснабжения на основе индекса экологической безопасности, который выражается через систему индикаторов и учитывает все аспекты влияния на окружающую среду, а также весомость разных видов техногенного воздействия на человека. Предложен механизм повышения экологической безопасности теплохладоснабжения зданий путем сбалансированного использования альтернативных и традиционных источников энергии.*

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, системы теплохладоснабжения, альтернативные источники энергии, традиционные источники энергии.

*Розроблено метод комплексної оцінки екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення на основі індексу, який виражається через обґрунтовані індикатори та враховує різні аспекти впливу на довкілля і вагомість різних видів техногенного впливу на людину. Запропоновано механізм підвищення екологічної безпеки теплохолодозабезпечення будівель шляхом збалансованого використання альтернативних і традиційних джерел енергії.*

**Ключові слова:** екологічна безпека, системи теплохолодозабезпечення, альтернативні джерела енергії, традиційні джерела енергії.

**Постановка проблемы.** Одной из проблем, стоящих перед человечеством, является вопрос обеспечения экологической безопасности, которая в значительной степени определяется источниками и уровнем производства и потребления энергии. Известно, что использование традиционных энергетических ресурсов приводит к накоплению твердых отходов (зола, шлаки, отработанные масла), выбросам в атмосферу продуктов сгорания – пылевидных частиц и кислотных оксидов ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ), что влечет за собой глобальный парниковый эффект, загрязнение поверхностных и грунтовых вод, которые в конечном счете негативно сказываются на здоровье людей.

В связи со сказанным выше, на современном этапе развития теории экологической безопасности основное внимание представляется целесообразным уделять разработке научно обоснованного системного подхода к решению проблем техногенной опасности, вызванной функционированием многих отраслей промышленного производства. В то же время, проблемы экологической безопасности коммунального сектора, в частности, систем

теплохладоснабжения, на которые приходится около 40% от общего загрязнения атмосферы, остаются мало изученными.

Анализ предыдущих исследований в области теоретических основ оценки экологической безопасности [1–4], перспектив использования ветровой и солнечной энергии в системах теплохладоснабжения зданий [5–7], подходов к моделированию энергетических потоков в альтернативных системах энергоснабжения [8–10] определил основные негативные экологические факторы функционирования систем теплохладоснабжения: загрязнение атмосферного воздуха газообразными выбросами; тепловое загрязнение окружающей среды; использование кислорода из воздуха для процесса горения традиционного топлива; образование токсичных твердых отходов; отчуждение территории под размещение систем теплохладоснабжения и их отходов; загрязнение водных ресурсов; необратимое водопользование; шумовое загрязнение; радиационное загрязнение; уменьшение биоразнообразия экосистем, которые, в конечном счете, влияют на здоровье людей.

Анализ известной научно-технической информации указывает на то, что, используя благоприятные климатические условия Украины, следовало бы расширить использование солнечных установок и ветрогенераторов в сочетании с использованием установок на топливе из возобновляемых источников. Крайне актуальной является замена газовых котельных на котельные, работающие на возобновляемых топливах. Так, в 2014 году в Николаевской области собрано более 2 млн тонн соломы. По теплотворной способности это эквивалентно 1 млрд м<sup>3</sup> природного газа. Использование пеллет из этой соломы позволит практически полностью заменить природный газ в котельных коммунального сектора. Кроме того, зола соломы является ценным удобрением. Котельные с использованием соломы могут значительно повысить уровень экологической безопасности при замене котлов на традиционных источниках энергии. Научный подход к решению этой экологической проблемы требует постепенного замещения традиционных энергоносителей возобновляемыми с соблюдением оптимального их соотношения.

На основе сочетания альтернативных и традиционных энергоресурсов в рамках концепции *Green buildings* [11, 12] нами разработаны математические модели и системы автоматического управления энергообеспечением зданий. Однако они позволили оценить только показатели энергоэффективности, не давая оценки уровня экологической безопасности систем теплохладобеспечения при комплексном использовании в них альтернативных и традиционных источников энергии. Разработка этого аспекта проблемы повышения уровня экологической безопасности систем теплохладобеспечения зданий путем сбалансированного перераспределения потоков энергии между альтернативными и традиционными источниками является, на наш взгляд, актуальной и своевременной.

**Целью исследования** является разработка методологии повышения уровня экологической безопасности теплохладобеспечения зданий путем перераспределения энергии между

альтернативными и традиционными источниками.

**Методология оценки уровня экологической безопасности.** На основе ранее выполненных исследований [13, 14] разработана методика оценки экологической безопасности систем теплохладоснабжения. С этой целью обоснованы индикаторы экологической безопасности, учитывающие разноплановость влияния данных систем на окружающую среду и здоровье человека, дающие возможность выполнить сравнительную оценку экологической безопасности при различных технических характеристиках систем.

Для комплексной оценки экологической безопасности систем теплохладобеспечения предложен индекс экологической безопасности (IEB), который выражается через обоснованные индикаторы, учитывающий влияние на все сферы окружающей среды: атмосферу, литосферу, гидросферу, биосферу, социосферу и ценность различных компонентов окружающей среды для человека:

$$IEB = 1 - \sum_{j=1}^k (I_j \cdot d_j),$$

где  $I_j$  – индикатор экологической безопасности для  $j$ -той среды (индикаторы загрязнения атмосферного воздуха, теплового загрязнения, использования кислорода, образования твердых отходов, отчуждения территории, загрязнения водных ресурсов, необратимого водопользования, шумового загрязнения, радиационного загрязнения, биоразнообразия экосистемы);  $d_j$  – коэффициент весомости  $j$ -той среды. Коэффициенты весомости сред определяются на основе экспертных оценок с учетом ценности различных компонентов окружающей среды.

С целью разработки математической модели перераспределения энергии между альтернативными и традиционными источниками в системе теплохладоснабжения здания предложена альтернативная система на основе ветровой, солнечной энергии и энергии возобновляемых топлив (соломы, шелухи подсолнечника и др.) с компенсацией энергодефицита традиционными источниками (рис. 1).

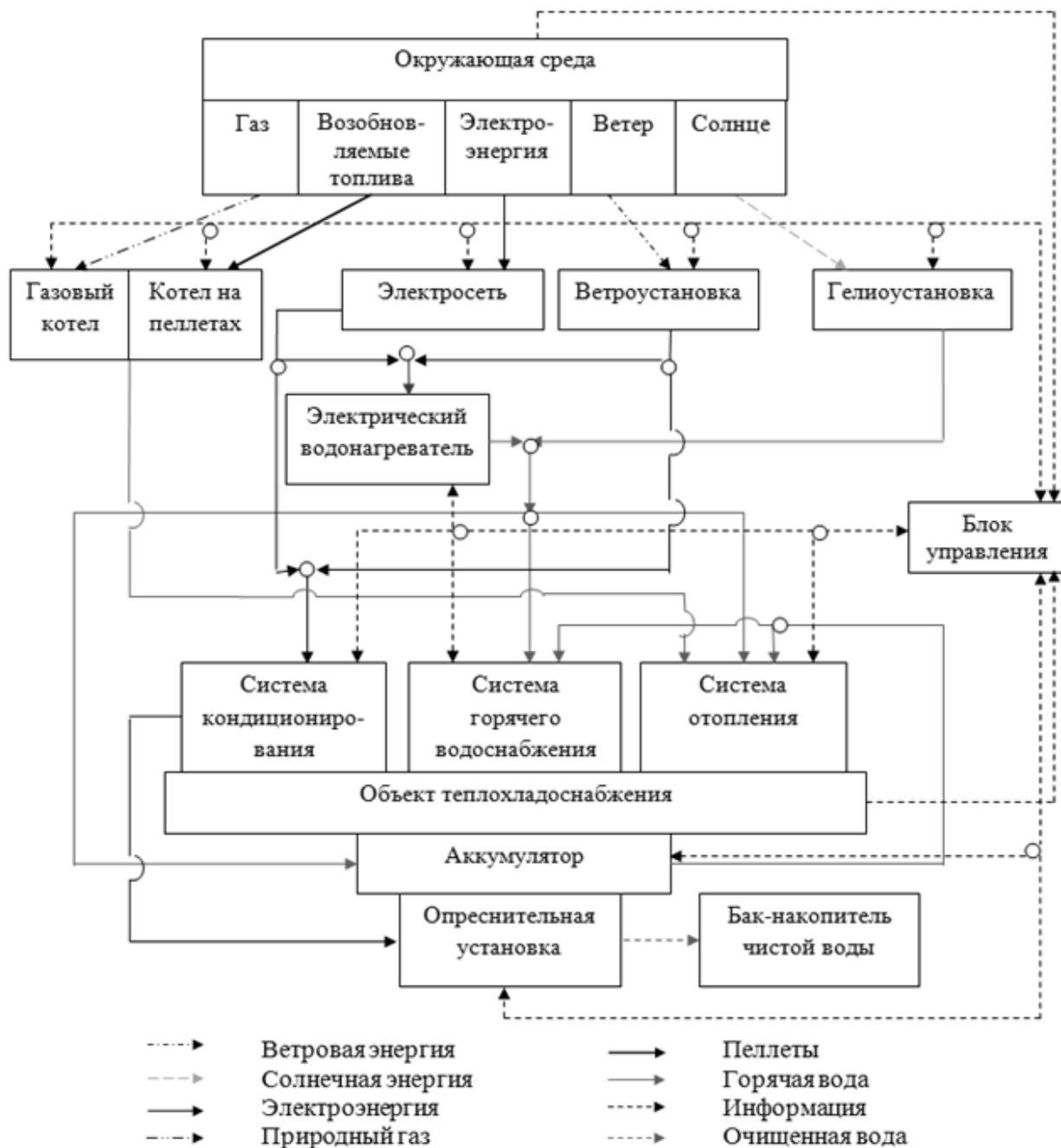


Рис. 1. Функциональная схема альтернативной системы теплоснабжения здания.

На основе предложенной функциональной схемы, анализа существующих математических моделей и разработанной методики оценки экологической безопасности систем теплоснабжения создана математическая модель процесса перераспределения потоков энергии между альтернативными и традиционными источниками, которая позволяет оптимизировать парамет-

ры системы теплоснабжения по показателю индекса экологической безопасности в зависимости от объемов замещения традиционных источников альтернативными, баланса различных возобновляемых источников (в частности, ветровой и солнечной энергии) и принципов аккумуляирования избыточной энергии. Целевая функция задачи оптимизации имеет вид:

$$\begin{aligned}
& IEB(A, D, V_{AK}) = \\
& = 1 - \sum_{j=1}^k \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{A \cdot (I_i \cdot \eta_0 - K(T_{BXi} - T_{HCi})) \cdot P_i + Cp_s \cdot \frac{\rho_n \cdot v_i^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{ел} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ев} \cdot t_i - \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вт} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_в \cdot \rho_в \cdot (T_{зв} - T_{xi}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} \right. \right. \\
& \left. \left. - K_{AK} \cdot A_{AK} \cdot \left( \frac{A \cdot (I_i \cdot \eta_0 - K(T_{BXi} - T_{HCi})) \cdot P_i + Cp_s \cdot \frac{\rho_n \cdot v_i^3}{2} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \eta_{ел} \cdot \eta_{мех} \cdot \eta_{ев} \cdot t_i - \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вт} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_в \cdot \rho_в \cdot (T_{зв} - T_{xi}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{[\sum_{i=1}^n K_n \cdot F_n + r \cdot L \cdot c_n \cdot \rho_n \cdot k] \cdot (T_{вн} - T_{нс_i}) \cdot t_i + q_{вт} \cdot F_{нидл} \cdot t_i + N \cdot g_i \cdot c_в \cdot \rho_в \cdot (T_{зв} - T_{xi}) \cdot (1 + \beta) \cdot t_i}{V_{AK} \cdot \rho_m \cdot c_m} + T_{xm} - T_{вн}) \cdot t_i \right) \right] \times \\
& \times \frac{\phi_{j-A}}{\phi_{j-T}} \cdot d_j \rightarrow \max,
\end{aligned}$$

где  $A$  – площадь поверхности гелиоколлектора, м<sup>2</sup>;  $I_i$  – интенсивность потока солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $\eta_0$  – эффективный оптический КПД коллектора;  $K$  – суммарный коэффициент теплопотерь коллектора, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $T_{вн}$  – температура внутри здания, °C;  $T_{нс_i}$  – температура окружающей среды в течение исследуемого  $i$ -го периода времени, °C;  $P_i$  – длительность солнечного сияния в течение исследуемого периода;  $\rho_n$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость ветра, м/с;  $\eta_{ел}$  – КПД генератора;  $\eta_{мех}$  – КПД трансмиссии;  $\eta_{ев}$  – КПД электрического водонагревателя;  $t_i$  – исследуемый период времени, с;  $c_n$  – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°C);  $K_n$  – коэффициент теплопотерь  $n$ -го элемента ограждающих конструкций, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $F_n$  – площадь поверхности  $n$ -го элемента ограждающих конструкций, м<sup>2</sup>; °C;  $r$  – поправочный коэффициент при расчете инфильтрации воздуха в помещение;  $L$  – объемный расход удаляющегося воздуха, не компенсированный приточным воздухом, м<sup>3</sup>/с·м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент учета влияния внутреннего потока в конструкциях;  $q_{вт}$  – суммарные удельные тепловыделения Вт/м<sup>2</sup>;  $F_{нидл}$  – площадь пола, м<sup>2</sup>;  $N$  – количество жителей, чел.;  $g$  – средний расход воды, л/(чел·с);  $c_в$  – удельная изобарная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C);  $\rho_в$  – плотность воды, кг/л;  $T_{зв}$  – температура воды в системе горячего водоснабжения, °C;  $T_{xi}$  – температура холодной воды,

$C$ ;  $\beta$  – коэффициент, характеризующий потери тепла трубопроводами в системе горячего водоснабжения;  $T_{xm}$  – начальная температура теплоносителя в аккумуляторе, °C;  $A_{AK}$  – площадь поверхности аккумулятора, м<sup>2</sup>.

На основе функциональной схемы и математической модели разработан алгоритм повышения экологической безопасности систем теплоснабжения путем перераспределения потоков ветровой, солнечной энергии и установок на альтернативных топливах между подсистемами горячего водоснабжения, отопления, кондиционирования и очистки воды с максимальным уровнем замещения традиционных ресурсов возобновляемыми источниками и полным использованием избыточной энергии, генерируемой альтернативными источниками не только за счет аккумуляирования энергии, но и дополнительного генерирования полезного продукта (очищенной воды) [15].

По разработанной модели выполнено математическое моделирование процесса перераспределения энергии между альтернативными и традиционными источниками в системах теплоснабжения отдельного жилого здания и производственного комплекса в климатических условиях г. Николаева и для территории Николаевской области в целом, оценен уровень экологической безопасности данных систем, а также реше-

на оптимизационная задачи по показателю индекса экологической безопасности.

Результаты моделирования показали, что учет перераспределения энергопотоков позволяет повысить уровень экологической безопасности альтернативной системы на 35%, а применение оптимального решения делает возможным повышение индекса экологической безопасности альтернативной системы, по сравнению с традиционной на угольном топливе, на 63%.

Использование возобновляемых источников энергии в системах теплоснабжения позволяет уменьшить загрязнение атмосферного воздуха на 43-66%, а объемы образуемых твердых отходов на 46-62% по сравнению с традиционной системой генерирования электроэнергии, производимой угольной теплоэлектроцентралью (как худшим вариантом). Обобщенные результаты сравнительной оценки экологической безопасности систем с различными техническими характеристиками приведены на рис. 2.

Результаты исследования изменения индекса экологической безопасности при внедрении ветровых и солнечных установок в существующие системы теплоснабжения разных регионов Николаевской области (Баштанского, Вознесенского, Николаевского, Очаковского, Первомайского)

показали возможность его повышения на 50-55%.

Результаты выполненного исследования внедрены при проектировании и эксплуатации гелиосистем горячего водоснабжения главного корпуса и двух общежитий Черноморского государственного университета имени Петра Могила, которые обеспечивают горячей водой кухни, душевые и уборные в общежитиях, а также душевые спортзала и столовую главного корпуса. В течение эксплуатации (2009-2012 гг.) гелиосистемы произвели 662 Гкал тепловой энергии, что обеспечило достижение экономического эффекта на уровне 60 тыс. грн.

**Выводы.** 1. Предложенные индикаторы экологической безопасности систем теплоснабжения позволяют проводить сравнительную оценку систем с различными техническими характеристиками на основе учета перераспределения потоков энергии между альтернативными и традиционными источниками.

2. Сформулированный интегральный индекс комплексной оценки экологической безопасности теплоснабжения на основе системы частных индикаторов обеспечивает учет разнородных аспектов влияния на окружающую среду и весомость различных видов техногенного воздействия на человека.

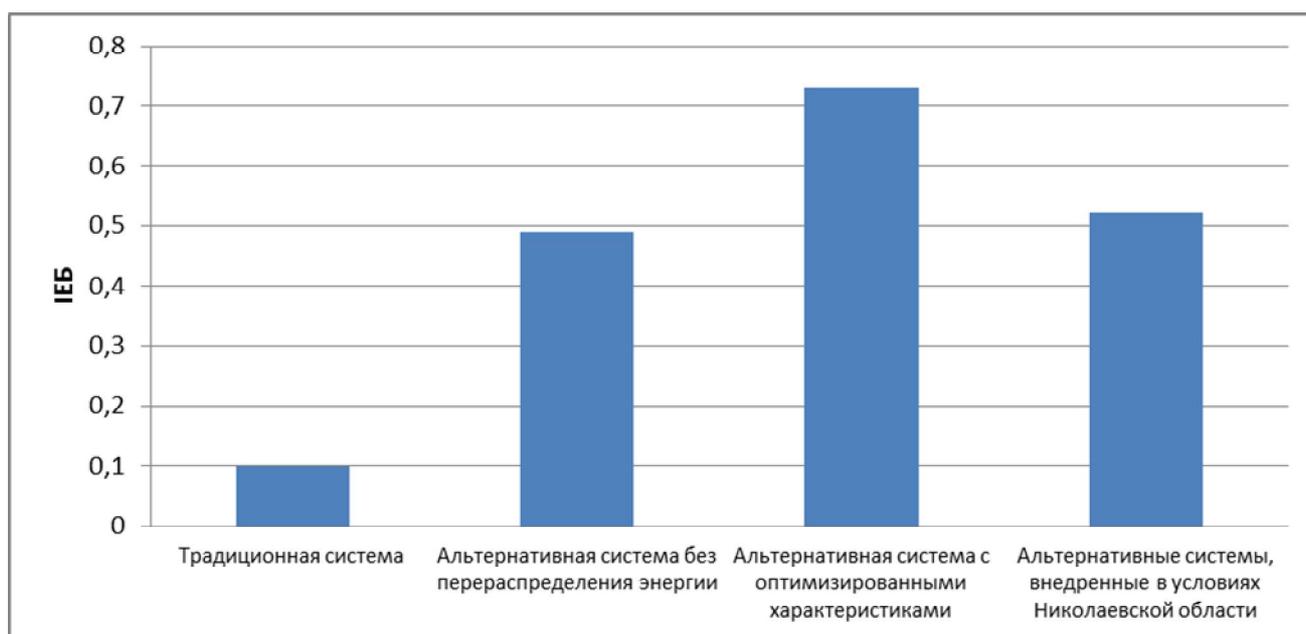


Рис. 2. Индекс экологической безопасности разных типов систем теплоснабжения.

3. Разработанная математическая модель перераспределения энергии в системах теплохладоснабжения между альтернативными и традиционными источниками позволяет оптимизировать объемы замещения традиционных источников и баланс различных возобновляемых источников по показателю индекса экологической безопасности на 15-35% в условиях юга Украины.

4. Разработанный алгоритм повышения экологической безопасности систем теплохладоснабжения зданий путем перераспределения потоков ветровой и солнечной энергии между подсистемами горячего водоснабжения, отопления, кондиционирования и очистки воды с максимальным уровнем замещения традиционных ресурсов альтернативными и полным использованием избыточной энергии обеспечивает повышение эффективности использования возобновляемых источников на 15-20%.

1. *Indicators of Sustainable Development. Framework and Methodologies.* – New York: United Nations, 1996. – 428 p.

2. *Fedrizzi R. Intro – What LEED Measures / R. Fedrizzi.* – United States Green Building Council, 2010. – 375 p.

3. *Risk Factors in Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems for Occupant / M. J. Mendell, Q. Lei-Gomez, A. G. Mirer, O. Steppanen, G. Brunner / [Электронный ресурс]:* стаття. – режим доступу до статті: [www.lbv.epa.gov](http://www.lbv.epa.gov).

4. *Качинський А.Б.* Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення [Електронний ресурс]: монографія / А. Б. Качинський – Режим доступу до монографії: <http://www.niss.gov.ua/book/Kachin/index.htm>.

5. *Шмандий В.М.* Стратегия управления экологической безопасностью: общие теоретические положения и региональный аспект / В.М. Шмандий // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (19). – С. 160–163.

6. *Забарний Г.М.* Енергетичний потенціал нетрадиційних джерел енергії України / Г. М. Забарний,

А.В. Шурчков. – К.: Видавництво НАН України. Інститут технічної теплофізики, 2002. – 211 с.

7. *Рабинович М.Д.* Использование солнечной энергии для теплоснабжения на Украине / М.Д. Рабинович, А.Р. Ферг // Возобновляемая энергия. – 2002. – №3. – С.13–15.

8. *Dirk Mangold.* Solar in the city. Active solar heating systems in urban areas // Renewable Energy World. – 2011. – Vol. 4. – № 3. – P. 100–111.

9. *Харченко Н.В.* Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.

10. *Яковлев А.И.* Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения: учебное пособие / А.И. Яковлев, А.М. Затучная. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", 2002. – 56 с.

11. *Computational and Mathematical Challenges in Modelling, Design, Optimization and Control of Energy Efficient Buildings.* Workshop on Future Directions in Applied Mathematics // Interdisciplinary Center for Applied Mathematics // I. Akhtar, J. Borggaard, J. Burns, E. Cliff, T. Herdman, L. Zietsman, S. Ahuja, C. Jacobson, S. Narayanan, A. Surana, 2011 // [ncsu.edu/crsc/wfdam/Talks/Burns.pdf](http://ncsu.edu/crsc/wfdam/Talks/Burns.pdf).

12. *Dandan Zh., Hong T., Yan D., Wang Ch.* A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: Energy Plus, DeST and DOE-2.1E., 2013.

13. *Клименко Л.П.* Індикатори зміни рівня екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення при впровадженні альтернативних джерел енергії / Л. П. Клименко, Н. О. Воскобойнікова // Наукові праці: Науково-методичний журнал. – Т. 163. Вип. 151. Техногенна безпека. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – С. 6–9.

14. *Воскобойнікова Н.О.* Математичне моделювання процесу теплохолодостачання будівлі при комбінуванні альтернативних та традиційних джерел для кліматичних умов м. Миколаєва / Н.О. Воскобойнікова // Праці Інституту електродинаміки НАН України: Збірник наукових праць. – Спеціальний випуск. – К., 2007. – С. 111–116.

15. *Клименко Л.П.* Алгоритм підвищення екологічної безпеки систем теплохолодозабезпечення будівель на основі альтернативних джерел енергії / Л.П. Клименко, Н.О. Воскобойнікова, Д.О. Крисінська // Екологічні проблеми традиційних і альтернативних джерел енергії. Горбуновські читання. – Чернівці: ЧФ НТУ "ХП", 2014. – С. 49–53.