



МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Е. В. Шешунова

*ФГБОУ ВО «Ярославская государственная
сельскохозяйственная академия» (г. Ярославль, Россия)*

e.sheshunova@yarcx.ru

Введение. В статье рассматриваются вопросы использования многокритериальных систем оптимизации, их преимущество перед однокритериальными. Впервые данная тема была рассмотрена итальянским экономистом В. Парето. В дальнейшем интерес ученых всего мира к изучению этого вопроса усилился, поскольку многокритериальные задачи, очевидно, присутствуют во всех сферах деятельности.

Материалы и методы. Для рассмотрения данного вопроса были составлены математические модели объекта оптимизации, выбраны критерии оптимальности, установлены возможные ограничения.

Результаты исследования. Задачи проектирования сложных систем всегда являются многокритериальными, поскольку при выборе достоверного варианта приходится учитывать множество различных требований, которые предъявляются к системе. Для получения более полной характеристики недостатков и достоинств проектируемого объекта было увеличено количество рассматриваемых критериев качества. Метод многокритериальной оптимизации предполагает возможность ранжирования критериев, т. е. определения преимуществ каждого предшествующего критерия перед следующим. В условиях неполноты информации, трудностей соизмерения значимости критериев оптимизации выбор лучшего представляет определенную сложность, которая, однако, частично нивелируется благодаря использованию рассмотренного в статье метода.

Обсуждение и заключения. В предыдущих исследованиях нами рассматривались задачи, в которых, как правило, был всего один основной критерий и, соответственно, единственная целевая функция. В случаях, когда качество решения оценивается по нескольким критериям, выбор лучшего решения представляет собой более сложную задачу, особенно учитывая, что неизвестно, какое именно из них будет лучшим. Именно поэтому окончательное решение должно учитывать важность каждой целевой функции. Основной сложностью при многокритериальной оптимизации является неоднозначность выбора «оптимального решения». Для ее преодоления необходимо учесть все требования, предъявляемые к рассматриваемому объекту.

Ключевые слова: оптимизация, многокритериальная система, критерий оптимальности, задача оптимизации, математическая модель, основы оптимизации

Для цитирования: Шешунова Е. В. Многокритериальные системы оптимизации в агропромышленном комплексе // Вестник Мордовского университета. 2017. Т. 27, № 1. С. 67–76. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201701.067-076

Благодарности: Автор выражает благодарность своему научному руководителю С. А. Краснову, а также руководству ФГБОУ ВО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия» за помощь при подготовке научной статьи.

MULTICRITERIA SYSTEMS OF OPTIMIZATION IN AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Ye. V. Sheshunova

Yaroslavl State Agricultural Academy (Yaroslavl, Russia)

e.sheshunova@yarcx.ru

Introduction. The article deals with multicriteria systems of optimization and their advantage over one-criterion systems. This approach is based on the key ideas of the famous economist V. Pareto. Recent interest of many scientists to this area of knowledge is caused by emergence of multicriteria tasks in all spheres of human activities.

Materials and Methods. For consideration of this issue, the mathematical models of an optimization object are made, the optimal criteria are chosen, the possible restrictions are set.

Results. Design of difficult systems is always multicriteria challenge, because the designers take into account many requirements for the system. For a complete review of all positive qualities and defects of the proposed facility, the number of quality criteria taken into account was increased. Choosing the best option is burdened by incomplete information and difficulties of determining the significance of optimization criteria. The method, presented by the authors, can overcome most of the difficulties.

Discussion and Conclusions. In the previous studies we considered the tasks where there was one main criterion and, accordingly, only the objective function. The choice of the best solutions for several criteria is a more complex task on. The final decision must take into account the importance of each objective function. The main difficulty with multi-criteria optimization is the selection of the best solution. It is necessary to take into account all requirements for the object under considering.

Keywords: optimization, multicriteria system, optimal criterion, problem of optimization, mathematical model, optimization bases

For citation: Sheshunova YeV. Multicriteria systems of optimization in agro-industrial complex. *Vestnik Mordovskogo universiteta* = Mordovia University Bulletin. 2017; 1(27):67-76. DOI: 10.15507/0236-2910.027.201701.067-076

Acknowledgements: I express my gratitude to Prof. Sergey Krasnov, and the management staff of Yaroslavl State Agricultural Academy for help in writing of the article.

Введение

Оптимизацией называется целенаправленная деятельность, которая заключается в получении наилучших результатов при заданных условиях [1].

Для нахождения оптимальных решений необходимы специальные математические методы, и уже в 18 в. ученые заложили математические основы оптимизации (численные методы, вариационное исчисление и др.) [Там же]. Кроме этого, введем понятие *критерия оптимальности* – количественной оценки оптимизируемого качества объекта [Там же].

На основании выбранного критерия оптимальности составляют целе-

вую функцию, которая представляет собой зависимость данного критерия от параметров, влияющих на ее значение. Вид критерия оптимальности или целевой функции определяется конкретной задачей оптимизации [2].

Для решения задачи оптимизации производят следующие операции:

- составление математической модели объекта оптимизации;
- выбор критерия оптимальности и составление целевой функции;
- установление возможных ограничений, которые накладываются на переменные;
- выбор метода оптимизации, позволяющего найти экстремальные значения искомых величин.



Обзор литературы

Вопросам, связанным с многокритериальной системой оптимизации, посвящено большое количество научных работ.

Например, А. Г. Трифонов уделял внимание множеству альтернативных методов; рассматривал метод достижения цели как задачу нелинейного программирования; анализировал стратегию взвешенных сумм, которая преобразует многокритериальную задачу минимизации в некую простую для всех выбранных объектов, чтобы в дальнейшем к ней можно было применить стандартный алгоритм оптимизации [3].

Учеными были предложены следующие методы многокритериальной оптимизации [4]:

- метод Ранга, предназначенный для поиска критериев на основе оценок экспертов;

- метод *Preobrazovanie* – для преобразования исходных данных по шкале Харрингтона;

- метод *Max*, представляющий собой поиск максимального значения и деление на него всех текущих значений;

- метод *Ves*, используемый в многомерной оптимизации (методе анализа иерархий);

- метод *PoiskMaxVesa* – для поиска максимального значения в методе многомерной оптимизации, позволяющий выбрать наилучшую альтернативу;

- метод *Proverka*, используемый в многомерной оптимизации (методе Ранга).

Д. И. Батищев, Д. Е. Шапошников рассматривали человеко-машинные процедуры решения задач многокритериального выбора. Основное внимание они уделяли анализу и использованию информации об относительной важности критериев оптимальности при принятии решений.

Исследования А. В. Лотова, И. И. Поспеловой посвящены теории много-

критериальной оптимизации и методам поддержки принятия решений при нескольких критериях.

В. В. Подиновским были рассмотрены основные идеи многокритериальных систем и дано представление о методах выбора оптимальных вариантов, оцениваемых по нескольким критериям с использованием информации об их относительной важности.

Мы предлагаем применить методы многокритериальной оптимизации в сельскохозяйственном производстве.

Материалы и методы

Рассмотрим теплообменник, который предназначен для охлаждения горячей жидкости, в данном случае молока, от температуры t_1 до температуры t_2 . В качестве хладагента использовалась вода с температурой t_3 . Функционирование теплообменника характеризовалось следующими информационными переменными: W_1 , W_2 – массовые расходы поступившего молока и хладагента; h – конструктивный тип теплообменника (противоточный, прямоточный пластинчатый); F – площадь поверхности теплообмена; Q – количество тепла, переданное потоком молока потоку хладагента; K – общий коэффициент теплопередачи; Δt – среднелогарифмическая разница температур; t_1 , t_2 , t_3 , t_4 – температуры молока и хладагента на входе и на выходе из теплообменника соответственно [5–7].

Математическую модель теплообменника представим в виде пяти информационных связей; основные уравнения теплопередачи приведем в следующих формулах [8]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_4) - (t_2 - t_3)}{\ln \frac{(t_1 - t_4)}{(t_2 - t_3)}}, \quad (2)$$

$$K = f(t_1, t_2, t_3, t_4, W_1, W_2), \quad (3)$$

$$W_1 \cdot c \cdot (t_1 - t_2) - W_2 \cdot c_2 \cdot (t_4 - t_3) = 0, \quad (4)$$

$$Q = W_1 \cdot c \cdot (t_1 - t_2). \quad (5)$$

где c и c_b – теплоемкость молока и воды соответственно.

Перечислим оптимизирующие информационные переменные для исследуемого теплообменника: $n = 5$; $m = 11$; $F = m - n = 6$. Согласно технологическим условиям функционирования теплообменника, регламентированными информационными переменными в системе являются W_1, t_1, t_2, t_3 .

В качестве оптимизирующих переменных были выбраны конструктивный тип теплообменника h и массовый расход хладагента W_2 . Численные значения базисных (искомых) информационных переменных ($F, Q, K, \Delta t, t_4$) получим после решения математической модели теплообменника [9–11].

В качестве хладоносителя был выбран хладон R410A, который имеет следующие характеристики:

- температура кипения – $-51,4^\circ\text{C}$;
- давление насыщенного пара – $1,56\text{ МПа}$;
- воспламеняемость отсутствует;
- коэффициент разрушения озона равен 0 [12–13].

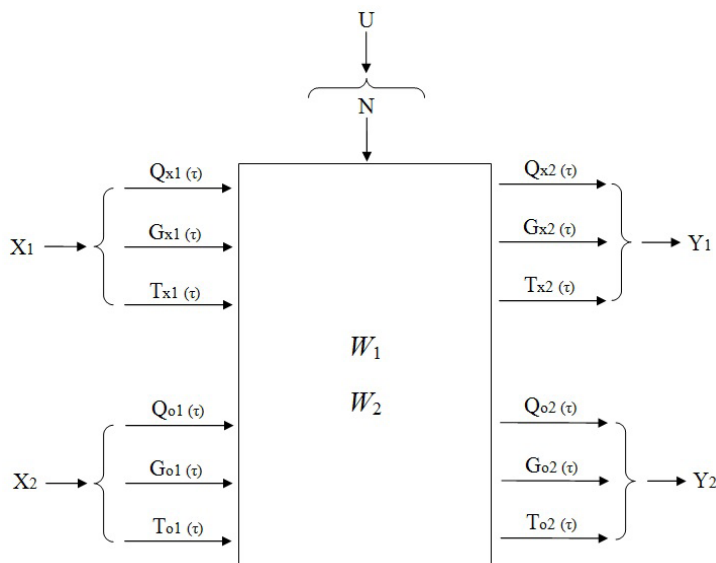
Также был использован тепловой насос, для которого применялись следующие критерии оптимизации:

- коэффициенты преобразования;
- температурные показатели (на входе и выходе из насоса);
- потребляемая мощность насоса;
- производительность;
- эксплуатационные показатели [14–33].

Многокритериальная оптимизация решает множество задач параметрической и структурной оптимизации.

Для расчета параметров нагрева воды и охлаждения молока с помощью теплового насоса была использована математическая модель с учетом переменных.

Схема моделирования установки, нагрева воды и охлаждения молока представлена на рис. 1 [34].



Р и с. 1. Схема моделирования установки нагрева воды и охлаждения молока

F i g. 1. Driving simulation of water heating and milk cooling installation



На данной схеме нагрев воды и охлаждение молока представлены в виде изменяющейся (динамической) системы, которая осуществляет преобразование входных воздействий в выходные переменные параметры.

Входной вектор X_1 и выходной вектор Y_1 относятся к грунтовой воде:

$$X_1 = \{Q_{x1}(\tau); G_{x1}(\tau); T_{x1}(\tau)\}, \quad (6)$$

$$Y_1 = \{Q_{x2}(\tau); G_{x2}(\tau); T_{x2}(\tau)\}, \quad (7)$$

где $Q_{x1}(\tau)$ – количество тепла, отбираемого грунтовой водой в единицу времени (холодопроизводительность), кВт; $G_{x1}(\tau)$ – расход грунтовой воды на входе в насос, кг/ч; $T_{x1}(\tau)$ – температура грунтовой воды на входе в насос, К; $Q_{x2}(\tau)$ – количество тепла, оставшегося у грунтовой воды, кВт; $G_{x2}(\tau)$ – расход грунтовой воды на выходе из насоса, кг/ч; $T_{x2}(\tau)$ – температура грунтовой воды на выходе из насоса, К.

Входной вектор X_2 и выходной вектор Y_2 относятся к воде, нагреваемой тепловым насосом:

$$X_2 = \{Q_{o1}(\tau); G_{o1}(\tau); T_{o1}(\tau)\}, \quad (8)$$

$$Y_2 = \{Q_{o2}(\tau); G_{o2}(\tau); T_{o2}(\tau)\}, \quad (9)$$

где $Q_{o1}(\tau)$ – количество тепла, которое переносится водой, поступающей для нагревания на входе в насос, кВт; $G_{o1}(\tau)$ – расход нагреваемой воды на входе в насос, кг/ч; $T_{o1}(\tau)$ – температура нагреваемой воды на входе в насос, К; $Q_{o2}(\tau)$ – количество тепла, которое передается в единицу времени нагреваемой воде, кВт; $G_{o2}(\tau)$ – расход нагреваемой воды на выходе из насоса, кг/ч; $T_{o2}(\tau)$ – температура нагреваемой воды на выходе из насоса, К;

Входной управляющий вектор U является мощностью компрессора N , кВт.

Выходные векторы Y_1 и Y_2 зависят от входных векторов F_1 и F_2 . Эта связь может быть выражена оператором W . При построении математической модели и ее технологического процесса необходимо установить вид и структуру оператора, который описывает зависимость выходных параметров от входных:

$$Y = W [X_1, X_2].$$

При нагреве воды и охлаждении молока с использованием теплового насоса мы получаем выражения:

$$Y_1 = W_1[X_1; X_2];$$

$$Y_2 = W_2[X_1; X_2],$$

$$Y_1 = \{Q_{x2}(\tau); G_{x2}(\tau); T_{x2}(\tau)\};$$

$$Y_2 = \{Q_{o2}(\tau); G_{o2}(\tau); T_{o2}(\tau)\}.$$

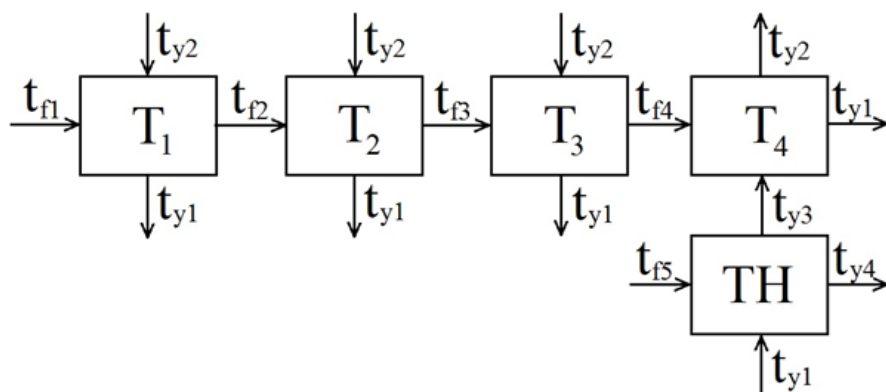
Входной управляющий вектор U представляет мощность компрессора N , кВт. Главная задача моделирования – получение математических зависимостей для определения холодо- $Q_{x1}(t)$ и теплопроизводительности $Q_{o2}(t)$ насоса:

$$Q_{x1}(t) = W_1[N; G_{x1}(t); T_{x1}(t)],$$

$$Q_{o2}(t) = W_2[N; G_{o1}(t); T_{o1}(t); T_{o2}(t);$$

$$G_{x1}(t); T_{x1}(t)].$$

Рассмотрим модель нагрева воды и охлаждения молока с использованием теплового насоса, которая будет являться функциональной (рис. 2) [7].



Р и с. 2. Модель нагрева воды и охлаждения молока с использованием теплового насоса
F i g. 2. Model of water heating and milk cooling using a heat pump

В качестве основных уравнений при расчете теплообмена, как известно, используются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса.

Определяющим фактором работы теплового насоса является, как было отмечено ранее, мощность компрессора N , поэтому необходимо установить ее зависимость от всех остальных характеристик работы теплового насоса [7]:

$$N = W_3 [q_{x1}(t); q_{o2}(t); G(t)],$$

$$N = q_1 - q_2. \quad (10)$$

Коэффициент преобразования тепла вычисляется следующим образом:

$$K_T = \frac{q_1}{N}. \quad (11)$$

Также укажем формулу для определения коэффициента преобразования холода:

$$K_E = \frac{q_2}{N}. \quad (12)$$

Таким образом, тепловой насос можно считать многофункциональной системой.

Результаты исследования

Задачи однокритериальной минимизации представляют собой самую про-

стую математическую модель оптимизации, в которой основная функция зависит от одной переменной. Для получения более полной характеристики параметров проектируемого объекта необходимо увеличить количество рассматриваемых критериев качества. Таким образом, задачи проектирования сложных систем всегда многокритериальны, поскольку при выборе достоверного варианта приходится учитывать множество различных требований, предъявляемых к системе.

Обсуждение и заключения

Многокритериальная оптимизация решает множество задач параметрической и структурной оптимизации. Необходимо отметить, что при использовании многокритериальной системы найти оптимальное решение гораздо сложнее, чем при однокритериальной. Однако при этом значительно повышается качество решения, а получаемые результаты достаточно приближены к реальным ситуациям поведения изучаемого объекта. Чем больше критериев качества вводится в рассмотрение, тем более точную характеристику бъекта можно получить. По нашему мнению, задачи сложных систем всегда многокритериальны, поскольку при выборе оптимального варианта необходимо учитывать множество различных требований, предъявляемых к рассматриваемому объекту.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Алексеев Е. Л., Пахомов В. Ф.** Моделирование и оптимизация технологических процессов в пищевой промышленности. М. : Агропромиздат, 1987. 272 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/2022138>
2. **Штойер Р.** Многокритериальная оптимизация / Пер. с англ. М. : Радио и связь, 1992. 504 с. URL: http://www.studmed.ru/shtoyer-r-mnogokriterialnaya-optimizaciya-teoriya-vychisleniya-i-prilozheniya_4232e774392.html
3. **Трифонов А. Г.** Многокритериальная оптимизация: руководство пользователя [Электронный ресурс]. URL: http://www.matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/16.php
4. **Черноруцкий И. Г.** Методы оптимизации и принятия решений. СПб. : Лань, 2001. 384 с. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=26886474>
5. **Алексеев Ю. П., Голубчиков Н. И.** Геотермальные ресурсы России // Энергия. Экономика, техника, экология. 2004. № 3. С. 42–45. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17717242>
6. **Ахмедов Р. Б.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. М. : О-во «Знание», 1988.
7. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии России / П. П. Безруких [и др.]. СПб. : Наука, 2002. 290 с. URL: http://www.intersolar.ru/books/renewable/re_resources.html
8. **Шешунова Е. В.** Использование теплового насоса на животноводческой ферме для получения холода и тепла : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ярославль, 2012. 8 с. URL: <http://www.docme.ru/doc/217780/tekhnosfera.com>
9. **Горшков В. Г.** Тепловые насосы : аналитический обзор // Справочник промышленного оборудования. 2004. № 2. URL: <http://www.teplosibmash.ru/articles/id/9>
10. **Гликсон А. Л., Дорошенко А. В.** Гелиосистемы и тепловые насосы в системах автономного тепло- и хладоснабжения // АВОК. 2004. № 7. URL: http://www.journal.esco.co.ua/2010_2/art215.htm
11. **Твайдел Дж., Уэйр А.** Возобновляемые источники энергии. М. : Энергоатомиздат, 1990. 392 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/172759>
12. Теоретические основы теплотехники: теплотехнический эксперимент : справочник / Под общ. ред. А. В. Клименко, В. М. Зорина. М. : Изд-во МЭИ, 2001. URL: <http://www.twirpx.com/file/445323>
13. **Быстрицкий Г. Ф.** Основы энергетики. М. : Инфра-М, 2007. 214 с. URL: <http://www.twirpx.com/file/143091>
14. **Васильев Г. П., Шилкин Н. В.** Использование низкопотенциальной тепловой энергии в теплонасосных системах // АВОК. 2003. № 2. С. 52–60. URL: http://www.journal.esco.co.ua/2008_4/art189.htm
15. **Ларин В.** Состояние и перспективы применения возобновляемых источников энергии в России. М. : LEAD CIS, 2006. 107 с. URL: http://www.journal.esco.co.ua/2009_4/art154.pdf
16. **Елистратов В. В.** Мониторинг развития возобновляемой энергетики в мире и России // Академия энергетики. 2008. № 2.
17. **Федоренко В. Ф., Сорокин Н. Т., Буклагин Д. С.** Инновационное развитие альтернативной энергетики. М. : ФГНУ «Росинфоргапротех». 2010. 348 с. URL: <http://www.expobooks.ru/catalogue/show/152146802>
18. **Gipe P.** Soaring to new heights the world energy market // Renewable Energy World. 2002. P. 33–47.
19. 480 kw peak concentrator power plant using nuclides parabolic trough technology / G. Sala [et al.] // 2 WC PVSEC. Vienna, 1998.
20. **Mills D.** Multiple floating offshore wind farm (MUFOW) // Sol. Progr. 2000. Vol. 21, № 2. URL: <http://www.technology.stfc.ac.uk/ERU/pdfs/mufow.pdf>
21. **Taude J. O. G., Hansen J. C.** The economics of wind power in local power systems // Energy Procedia. 2012. Vol. 24. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.06.094
22. **Fearon J.** The history and development of the heat pump, refrigeration and air conditioning. 1978.

23. **Atkinson L.** Single pressure absorption heat pump analysis : a dissertation. Georgia Institute of Technology, 2000. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/3463/83d5cfd3b12d189de2963b264cbf06c9884.pdf>
24. **Rybach L.** Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and sustainability aspects of GHPS. International course of geothermal heat pumps, 2002. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2002/Rybach.pdf>
25. **Rubach L., Sanner B.** Ground-source heat pump systems – the European experience // Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. 2000. Vol. 21/1. URL: <https://www.sanner-geo.de/media/art4.pdf>
26. **Sanner B.** Ground heat sources for heat pumps (classification, characteristics, advantages). 2002. URL: <https://pangea.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/szeged/I-9-01.pdf>
27. Saving energy with residential heat pumps in cold climates : maxi brochure. CADET, 1977.
28. Combined production of heat and electrical power // Bergbau. 1988. Vol. 39. № 7.
29. **Kelly P. J.** Practical guide to «free energy» devices [Электронный ресурс]. URL: <http://www.free-energy-info.co.uk/PJKbook.pdf>
30. **Rabin Y., Korin E.** Thermal analysis of a helical heat exchange for long-term thermal energy storage in the ground // International Journal Heat and Mass Transfer. 1996. Vol. 39, № 5. P. 1051–1065. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=491435>
31. **Svec O. J., Palmer J. H. L.** Performance of spiral ground heat exchanger for heat pump application // International Journal of Energy Research. 1989. Vol. 13. P. 503–510. DOI: 10.1002/er.4440130502
32. Livestocks long shadow / H. Steinfeld [et al.]. Rome : FAU, 2006. P. 345–367. URL: <http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM>
33. **Flachowsky G.** Potenziale zur reduzierung der methan-emission beiwiederfaern // Zuchtungskunde. 2007. Vol. 79 (6). P. 417–465. URL: http://www.zuechtungskunde.de/artikel.dll/methanreduzieren-zueku6-07_ODcyMDk0.pdf
34. **Шешунова Е. В.** Использование геотермального тепла с применением теплового насоса на животноводческой ферме // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5554>

Поступила 30.06.2016; принята к публикации 21.12.2016; опубликована онлайн 31.03.2017

Об авторах:

Шешунова Елена Владимировна, декан инженерного факультета ФГБОУ ВО «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия» (150042, Россия, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, д. 58), кандидат технических наук, доцент, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7805-5656>, e.sheshunova@yarcx.ru

Автор прочитала и одобрила окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Alekseyev YeL, Pakhomov VF. Modelirovaniye i optimizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v pishchevoy promyshlennosti [The modeling and optimization of technological processes in the food industry]. Moscow: Agropromizdat; 1987. Available from: <http://www.twirpx.com/file/2022138> (In Russ.)
2. Shtoyer R. Mnogokriterialnaya optimizatsiya [Multi-criteria optimization]. Moscow: Radio i svyaz; 1992. Available from: http://www.studmed.ru/shtoyer-r-mnogokriterialnaya-optimizaciya-teoriya-vychisleniya-i-prilozheniya_4232e774392.html (In Russ.)
3. Trifonov AG. Mnogokriterialnaya optimizatsiya: rukovodstvo polzovatelya [Multi-criteria optimization: User's guide]. Available from: http://www.matlab.exponenta.ru/optimiz/book_1/16.php (In Russ.)
4. Chernorutskiy IG. Metody optimizatsii i prinyatiya resheniy. St. Petersburg: Lan; 2001. Available from: <http://elibrary.ru/item.asp?id=26886474> (In Russ.)



5. Alekseyev YuP, Golubchikov NI. Geotermalnyye resursy Rossii [Geothermal resources of Russia]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* = Energy: Economics, technology, ecology. 2004; 3:42-45. Available from: <http://elibrary.ru/item.asp?id=17717242> (In Russ.)
6. Akhmedov RB. Netraditsionnyye i vozobnovlyayemye istochniki energii [Alternative and renewable energy sources]. Moscow: Znaniye Publ.; 1988. (In Russ.)
7. Bezrukh PP, Arbuzov YuD, Borisov GA, Vissarionov VI, Yevdokimov VM, Malinin NK, et al. Resursy i effektivnost ispolzovaniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii Rossii [Resources and efficiency of the use of renewable sources of energy Russia]. St. Petersburg: Nauka; 2002. Available from: http://www.intersolar.ru/books/renewable/re_resources.html (In Russ.)
8. Sheshunova YeV. Ispolzovaniye teplovogo nasosa na zhivotnovodcheskoy ferme dlya polucheniya kholoda i tepla: avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk [Using a heat pump on livestock farm to provide heat and cold: Abstract of Ph.D. (Engineering) thesis]. Moscow, 2012. Available from: <http://www.docme.ru/doc/217780/tekhnosfera.com> (In Russ.)
9. Gorskoy VG. Teplovyye nasosy: analiticheskiy obzor [Heat pumps: analytical review]. *Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya* = Directory of Industrial Equipment. 2004; 2. Available from: <http://www.teplosibmash.ru/articles/id/9> (In Russ.)
10. Glikson AL, Doroshenko AV. Geliosistemy i teplovyye nasosy v sistemakh avtonomnogo teplo- i khladosnabzheniya [Solar and heat pump in autonomous heating and cooling systems]. *Elektronnyy zhurnal energoservisnoy kompanii "Ekologicheskkiye sistemy"* = Energy service company Ecological Systems electronic journal. 2004; 7. Available from: http://www.journal.esco.co.ua/2010_2/art215.htm (In Russ.)
11. Tvaydel Dzh., Ueyr A. Vozobnovlyayemye istochniki energii [Renewable energy sources]. Moscow: Energoatomizdat; 1990. Available from: <http://www.twirpx.com/file/172759> (In Russ.)
12. Klimenko AV, Zorina VM, editors. Teoreticheskiye osnovy teplotekhniki: teplotekhnicheskiiy eksperiment: spravochnik [Theoretical basics of heat: Thermal experiment: Guide] Moscow: MEI Publ.; 2001. Available from: <http://www.twirpx.com/file/445323> (In Russ.)
13. Bystritskiy GF. Osnovy energetiki [Basics of energy]. Moscow: Infra-M; 2007. Available from: <http://www.twirpx.com/file/143091> (In Russ.)
14. Vasilyev GP, Shilkin NV. Ispolzovaniye nizkopotentsialnoy teplovoy energii v teplonasosnykh sistemakh [Using the low-potential thermal energy into heat pump systems]. *Elektronnyy zhurnal energoservisnoy kompanii "Ekologicheskkiye sistemy"* = Energy service company Ecological Systems electronic journal. 2003; 2:52-60. Available from: http://www.journal.esco.co.ua/2008_4/art189.htm (In Russ.)
15. Larin V. Sostoyaniye i perspektivy primeneniya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Rossii [Status and prospects of renewable energy in Russia]. Moscow: LEAD CIS; 2006. Available from: http://www.journal.esco.co.ua/2009_4/art154.pdf (In Russ.)
16. Yelistratov VV. Monitoring razvitiya vozobnovlyayemoy energetiki v mire i Rossii [Monitoring the development of renewable energy in the world and Russia]. *Bioenergetika* = Bioenergetics. 2008; 4:26-38. (In Russ.)
17. Fedorenko VF, Sorokin NT, Buklagin DS. Innovatsionnoye razvitiye alternativnoy energetiki [Innovative development of alternative energy]. Moscow: Rosinformagrotekh; 2010. Available from: <http://www.expobooks.ru/catalogue/show/152146802> (In Russ.)
18. Gipe P. Soaring to new heights the world energy market. *Renewable Energy World*. 2002; 33-47.
19. Sala G, et al. 480 kw peak concentrator power plant using nuclides parabolic trough technology. 2 WC PVSEC. Vienna, 1998.
20. Mills D. Multiple floating offshore wind farm (MUFOW). *Sol. Progr*. 2000; 2(21). Available from: <http://www.technology.stfc.ac.uk/ERU/pdfs/mufow.pdf>
21. Taude JOG, Hansen JC. The economics of wind power in local power systems. *Energy Procedia*. 2012; 24. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.06.094
22. Fearon J. The history and development of the heat pump, refrigeration and air conditioning. 1978.
23. Atkinson L. Single pressure absorption heat pump analysis: a dissertation. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 2000. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/3463/83d5cfcd3b12d189de2963b264cbf06c9884.pdf>

24. Rybach L. Status and prospects of geothermal heat pumps (GHP) in Europe and sustainability aspects of GHPS. International course of geothermal heat pumps, 2002. Available from: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2002/Rybach.pdf>
25. Rubach L, Sanner B. Ground-source heat pump systems – the European experience. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin. 2000; 1(21). Available from: <https://www.sanner-geo.de/media/art4.pdf>
26. Sanner V. Ground Heat Sources for Heat Pumps (classification, characteristics, advantages). 2002. Available from: <https://pangea.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/szeged/I-9-01.pdf>
27. Saving energy with residential heat pumps in cold climates: maxi brochure. CADET; 1977.
28. Combined production of heat and electrical power. Bergbau; 1988; 7(39).
29. Kelly PJ. Practical guide to “free energy” devices. Available from: <http://www.free-energy-info.co.uk/PJKbook.pdf>
30. Rabin Y, Korin E. Thermal analysis of a helical heat exchange for long-term thermal energy storage in the ground. International Journal Heat and Mass Transfer. 1996; 5(39):1051-1065. Available from: <http://elibrary.ru/item.asp?id=491435>
31. Svec OJ, Palmer JHL. Performance of spiral ground heat exchanger for heat pump application. International Journal of Energy Research. 1989; 13:503-510. DOI: 10.1002/er.4440130502
32. Steinfeld H, et al. Livestocks long shadow. Rome: FAO; 2006. Available from: <http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.htm>
33. Flachowsky G. Potenziale zur reduzierung der methan-emission beiwiederfaern. Zuchtungskunde. 2007; 79 (6):417-465. Available from: http://www.zuechtungskunde.de/artikel.dll/methanreduzieren-zueku6-07_ODcyMDk0.pdf
34. Sheshunova YeV. Ispolzovaniye geotermalnogo tepla s primeneniym teplovogo nasosa na zhi-votnovodcheskoy ferme [The use of geothermal heat with heat pump in the cattle farm]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2012; 2. Available from: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5554> (In Russ.)

Submitted 30.06.2016; revised 21.12.2016; published online 31.03.2017

About the author:

Yelena V. Sheshunova, Dean of Faculty of Engineering, Yaroslavl State Agricultural Academy (58 Tutayevskoye Rd., Yaroslavl 150042, Russia), Ph.D. (Engineering), docent, **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-7805-5656>, e.sheshunova@yarcx.ru

The author have read and approved the final manuscript.