

УДК 697.7

© Н. С. Пономарев, канд. физ.-мат. наук, доцент

© Сунь Цзяминь, аспирант

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: pnmrv17@mail.ru, sunjiamingvv@yandex.ru

© В. К. Аверьянов, д-р техн. наук, профессор,
чл.-кор. РААСН

(АО «Газпром промгаз», Москва, Россия)

E-mail: avk2271216@yandex.ru

© А. В. Цыганков, д-р техн. наук, профессор

(Образовательный центр «Энергоэффективные
инженерные системы» НИУ ИТМО,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: tsygaav@hotmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-5-86-95

© N. S. Ponomarev, PhD in Sci. Phys.-Math.,
Associate Professor

© Sun Jiaming, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: pnmrv17@mail.ru, sunjiamingvv@yandex.ru

© V. K. Averyanov, Dr. Sci. Tech., Professor,
Correspondent Member of RAACS

(«Gazprom Promgaz» JSC, Moscow, Russia)
E-mail: avk2271216@yandex.ru

© A. V. Tsygankov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Educational center «Energy Efficient Engineering
Systems» ITMO, St. Petersburg, Russia)

E-mail: tsygaav@hotmail.com

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГИИ СОЛНЦА И БИОМАССЫ

ENERGY EFFICIENCY OF A HYBRID HEATING SYSTEM BASED ON SOLAR AND BIOMASS ENERGY

Представлены результаты исследований гибридной системы отопления на основе солнечной энергии и частичной газификации биомассы (HBSHS) для отопления сельских домов в Китае. Приведен пример математической модели отдельного элемента системы. На основе построенной в программе TRNSYS динамической имитационной модели гибридной системы отопления выполнен анализ энергоэффективности. Выявлено влияние рабочих параметров системы на ее термодинамические характеристики. Выполнено сравнение показателей работы HBSHS в дни с минимальной и максимальной тепловой нагрузкой.

Ключевые слова: отопление, солнечная энергия, газификация биомассы, энергоэффективность.

The paper presents the results of research on a hybrid heating system based on solar energy and partial biomass gasification (HBSHS) for heating rural homes in China. An example of a mathematical model of a separate element of the system is given. Based on the dynamic simulation model of a hybrid heating system built in the TRNSYS program, an energy efficiency analysis was performed. The influence of the operating parameters of the system on its thermodynamic characteristics is revealed. The HBSHS performance indicators were compared on days with minimum and maximum heat load.

Keywords: heating, solar energy, biomass gasification, energy efficiency.

Введение

Правительство Китая в сентябре 2020 г. приняло решение об устойчивом снижении уровня выбросов углерода и углеродной нейтральности к 2030 г. [1, 2], что связано с необходимостью изменения структуры потребления топливных ресурсов.

В энергетической структуре Китая в 2022 г. энергопотребление за счет использования угля составляло 56,2 % от общего

потребления энергии [3]. Согласно исследованию Пекинского университета [4], потребление угля в сельских районах, преимущественно в Северо-Западном регионе, составляет всего 2,9 % от общего потребления энергии, но выбросы мелкодисперсных частиц, диоксида серы и оксидов азота составляют 29, 11 и 2,2 % соответственно. В связи с этим переход на использование возобновляемых источников энергии вместо угля для отопле-

ния на северо-западе Китая имеет большое значение для улучшения экологической обстановки и повышения уровня энергосбережения.

Основным направлением будущего развития сельской энергетики является использование солнечной энергии и биомассы. Фотоэлектрический потенциал в сельских районах Китая составляет $2,96 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год, что эквивалентно примерно 890 млн т стандартного угля. Ежегодно в результате жизнедеятельности в сельской местности Китая производится около 674 млн т соломы и 110 млн т сельскохозяйственных отходов, 3,81 млн т навоза животных (в сыром весе), 340 млн т бытовых отходов, 140 млн т лесных отходов, что эквивалентно 928 млн т стандартного угля [4]. Огромный потенциал возобновляемой энергетики может позволить добиться нулевого спроса на уголь в сельской местности.

Из-за нестабильности ресурсов солнечной энергии в холодный период, ограниченности площади солнечного коллектора, избытка выработки теплоты в теплый период года [5, 6] солнечная отопительная установка может играть только вспомогательную роль для обеспечения надежности системы горячего водоснабжения [7]. В настоящее время существуют различные формы сочетания систем солнечного теплоснабжения с источниками энергии, такими как электрическое отопление [8], газовые котлы [9], тепловые насосы с воздушным [10] и грунтовым источником теплоты [11] и биомасса [12].

Технологии использования биомассы [13–17] включают формирование топливных гранул, пиролиз и газификацию, производство метана. Биомасса разрабатывалась в течение многих лет, однако ее внедрение тормозится, например, из-за образования высокой концентрации твердых частиц и NO_x [18], древесной смолы [19]. Низкие температуры наружного воздуха в холодный период года существенно снижают эффективность про-

изводства метана в процессе анаэробной ферментации [20].

В последние годы в мире появилось больше исследований, посвященных гибридным системам отопления на основе солнечной энергии и биомассы. О том, что в Китае гибридная система отопления на основе солнечной энергии и биомассы показала наилучшие результаты, говорят социальные, экологические и экономические показатели пяти типичных сельских систем отопления [21]. Такие же результаты получили в Швеции, где с 2004 г. на севере проектируются системы теплоснабжения на основе солнечной энергии и биомассы [22]. По результатам исследований гибридной системы доля солнечной энергии и биомассы в общей тепловой мощности составила 52,9 % и 47,1 % соответственно [23]. V. Chen [24] получил для разработанной гибридной системы энергоэффективность порядка 30 %.

В настоящее время исследовались преимущественно гибридные системы отопления типа «солнечный котел на биомассе» и «солнечный котел на биогазе», а гибридная система отопления на основе солнечной энергии и технологии газификации биомассы практически не изучена. Для технологии газификации биомассы рассматриваются два метода: полная газификация и частичная газификация. Большинство этих исследований было посвящено применению технологий использования солнечной энергии и полной газификации биомассы в гибридных системах охлаждения, отопления и электроснабжения. Например, в работе [25] предложена система когенерации на основе биомассы и солнечной энергии, при этом образующийся газ биомассы используется для выработки электроэнергии, что способствует увеличению тепловой эффективности системы на 25 % по сравнению с фотоэлектрическими системами выработки электроэнергии. Учитывая несомненный интерес к использованию возобновляемых

источников энергии, в данной работе представлены результаты исследования гибридной системы отопления (hybrid biomass-solar heating system или HBSHS) для жилого здания [26, 27].

Методология

Гибридная система (рис. 1 и 2) состоит из следующих функциональных компонентов: подсистемы частичной газификации биомассы, включающей установку карбонизации биомассы; солнечной подсистемы, состоящей из вакуумных трубчатых коллекторов и коллекторов с плоскими пластинами;



Рис. 1. Общий вид опытной установки

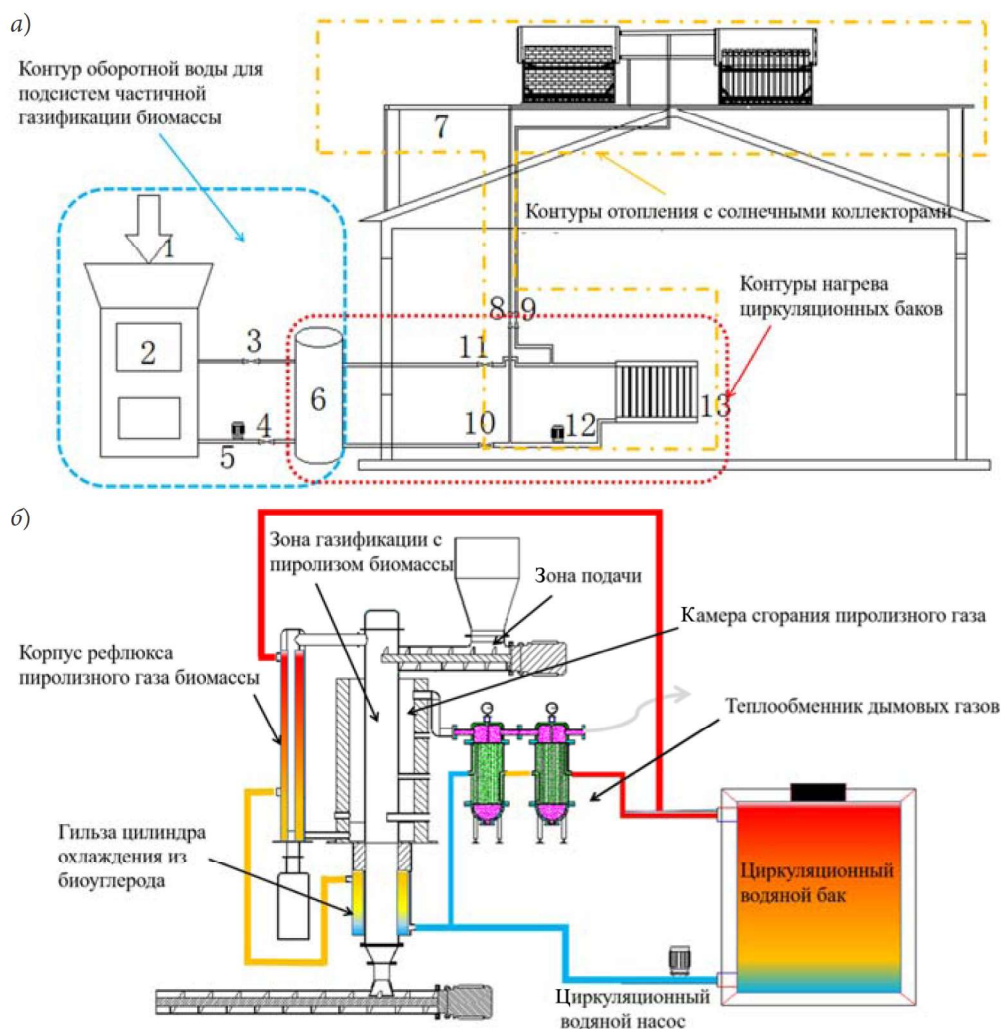


Рис. 2. Принципиальные схемы устройств: а — гибридной системы отопления на основе биомассы и солнечной энергии; б — подсистемы карбонизации биомассы; 1 — биомасса; 2 — устройство частичной газификации биомассы; 3–4 — запорный клапан; 5 — насос циркуляционной воды; 6 — бак-аккумулятор тепла; 7 — солнечный коллектор; 8–11 — блок управления — соленоидный клапан; 12 — насос отопительной воды; 13 — радиатор

трубопроводов и вспомогательного оборудования.

В работе [27] использован метод эмерджентного (системного) анализа для оценки теплового потенциала солнечно-биогазовой отопительной системы при различных вариантах исходного сырья (биомассы). В [26] предпринята попытка оценки термодинамических характеристик системы на основе круглогодичного динамического моделирования с использованием программного обеспечения TRNSYS [28]. В результате получена имитационная модель гибридной системы отопления (рис. 3).

Программа TRNSYS позволяет создать математические модели здания, тепловых зон здания, отдельных узлов инженерных систем. При расчетах может быть использована библиотека погодных условий региона. В данном исследовании в TRNSYS вводится

файл эскизной модели здания, эксплуатационные параметры, расчетная температура отопления в помещении, параметры настройки оборудования.

Результаты исследований

В процессе работы в программе TRNSYS для исследуемого объекта получено распределение тепловой нагрузки здания за отопительный сезон (рис. 4), что в последующем может быть использовано для разработки алгоритма управления системой и оценки энергетических показателей.

В качестве примера рассмотрено создание математической модели зоны охлаждения горячего биоуглерода (см. рис. 2). Для моделирования эта зона может рассматриваться как многослойный цилиндр с начальной температурой, которая постепенно понижается в течение определенного времени. Поступление теплоты в зону охлаждения

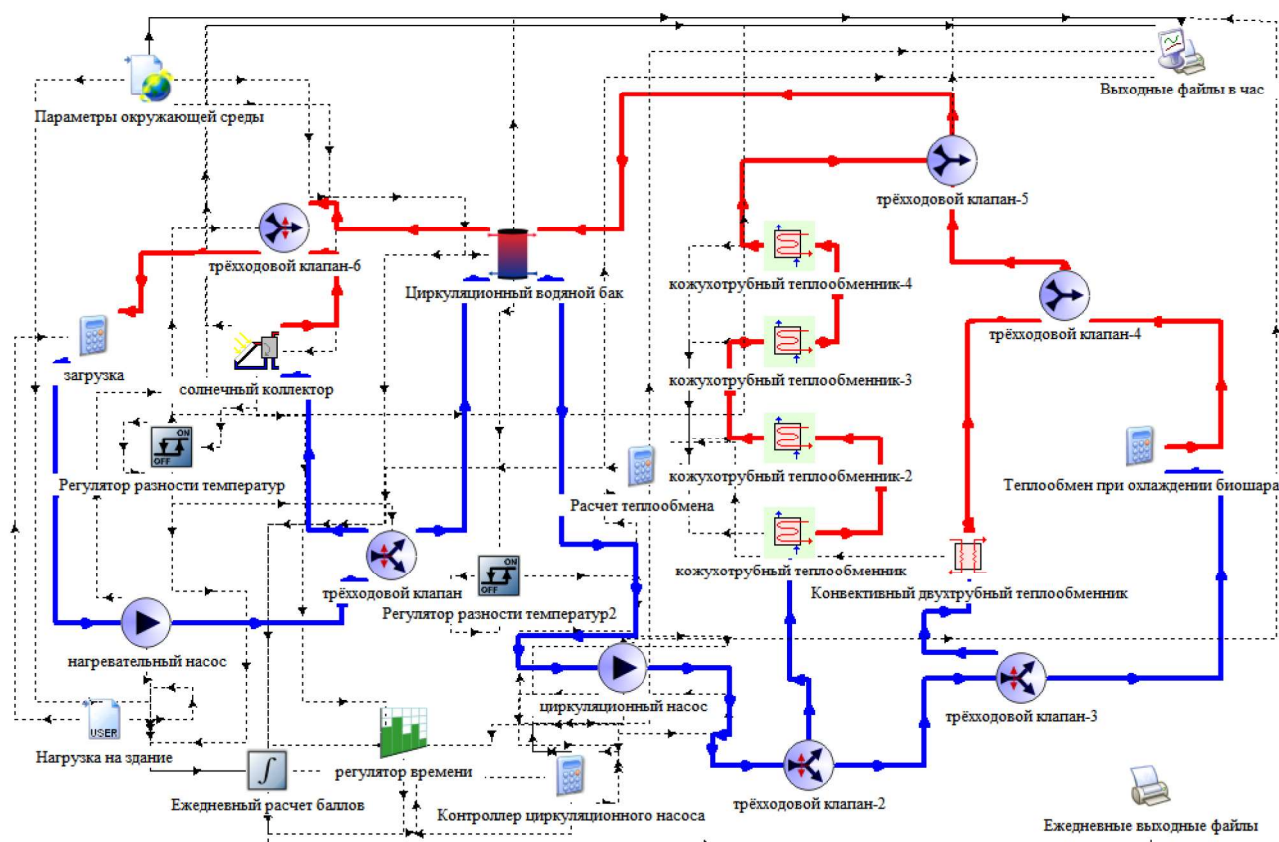


Рис. 3. Структура имитационной модели гибридной системы отопления

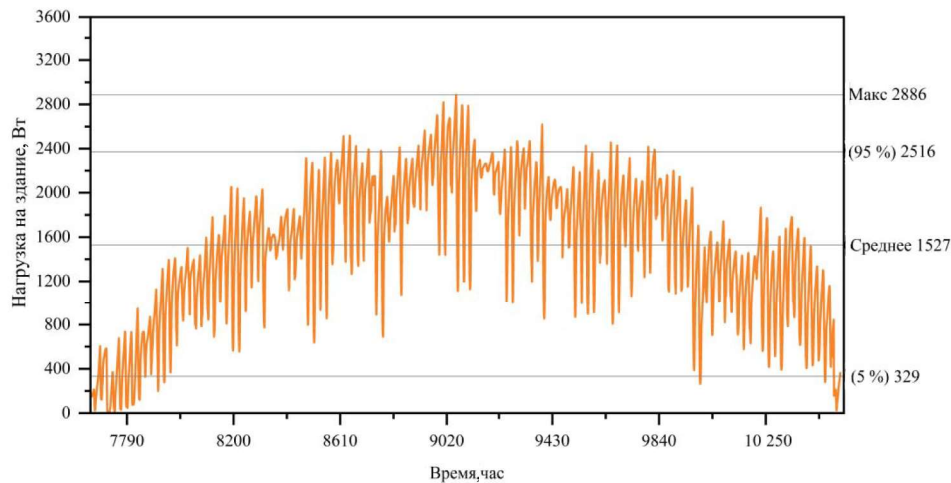


Рис. 4. Распределение тепловой нагрузки здания за отопительный сезон

происходит за счет явной теплоты высоко-температурного биоуглерода (q_s , кВт), а отвод — за счет теплопередачи циркуляционной воде (q_{bc} , кВт). Поскольку подсистема частичной газификации биомассы в процессе работы установки производит биоуглерод один раз в час [26], внутренняя температура и теплообмен в зоне охлаждения горячего биоуглерода циклически изменяются в течение часа. Однако, когда темп моделирования составляет 1 ч, а производство биоуглерода и начальная температура остаются неизменными, среднечасовой теплообмен является функцией расхода и температуры циркулирующей воды. В данной работе создана полуэмпирическая модель, описывающая интенсивность теплообмена циркуляционной воды в течение 1 ч между каждым поступлением биоуглерода. С помощью пакета прикладных программ MATLAB выполнена многомерная нелинейная регрессия на основе данных экспериментальной выборки [26]. Решение представляет среднюю теплоотдачу циркуляционной воде в зоне охлаждения углерода в час:

$$q_{bc} = 0,279 - 0,993m_{w-bs} + 60,380m_{w-bs}^2 - 427,7m_{w-bs}^3 - 0,0019T_{w-i} - 3,29 \cdot 10^{-6}T_{w-i}^2 - 0,014m_{w-bs} \cdot T_{w-i} - 0,161m_{w-bs}^2 \cdot T_{w-i} + 0,00016m_{w-bs} \cdot T_{w-i}^2, \quad (1)$$

где q_{bc} — средняя теплоотдача циркуляционной воде в зоне охлаждения углерода, кВт; m_{w-bs} — массовый расход воды в зоне охлаждения, кг/с; T_{w-i} — средняя температура охлаждающей воды на входе в зону охлаждения в течение 1 ч, К.

Результаты решения уравнения (1) представлены на рис. 5.

Обсуждение

Для анализа эксплуатационных характеристик системы отопления выбран типичный день в начале и середине отопительного сезона. На рис. 6 представлены результаты расчета в программе TRNSYS почасовой мощности комбинированной системы отопления в типичные дни минимальной и максимальной нагрузки соответственно.

На рис. 6 отрицательное число на оси ординат показывает почасовую тепловую нагрузку, аккумуляцию теплоты в солнечных резервуарах и резервуарах циркуляционной воды. А положительные числа указывают на часовую тепловую мощность солнечных, биомассовых, солнечно-тепловых накопителей и рециркуляционных баков. В типичных условиях малой нагрузки (см. рис. 6, а) средняя температура составляет 10,1 °С, средняя интенсивность солнечного излучения — 344,7 Вт/м², а средняя тепловая нагрузка — 251,1 Вт. Тепловая нагрузка, покрываемая

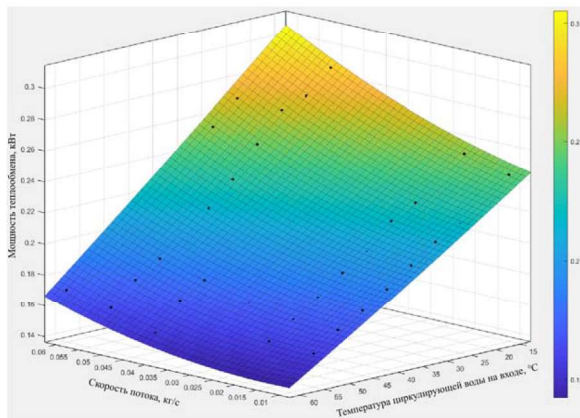


Рис. 5. Среднечасовая тепловая мощность в зоне охлаждения биоуглерода

солнечной подсистемой, составляет 52,1 %. Теплота, аккумулированная в циркуляционном баке за предыдущий день, используется для отопления, когда температура солнечного тепла аккумулятора не достигает 56 °C (рис. 7) между 0:00 и восходом солнца. В этот момент видно, что температура циркуляционной воды на выходе из бака снижается и составляет менее 60 °C. Далее, по мере включения подсистемы биомассы, циркуляционный бак начинает поглощать теплоту и нагреваться, а отключение подсистемы биомассы происходит, когда температура

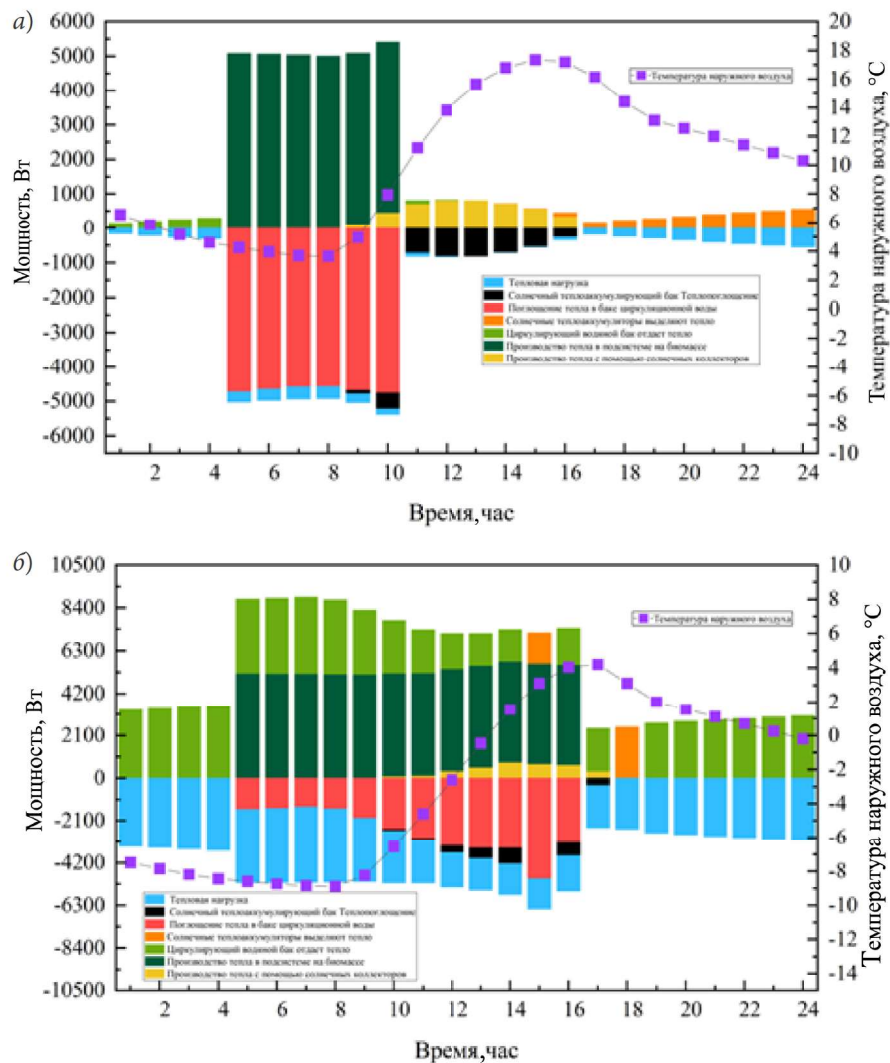


Рис. 6. Отопительная нагрузка и часовая тепловая мощность отдельных элементов отопительной установки: а — в начале отопительного периода; б — в середине отопительного периода

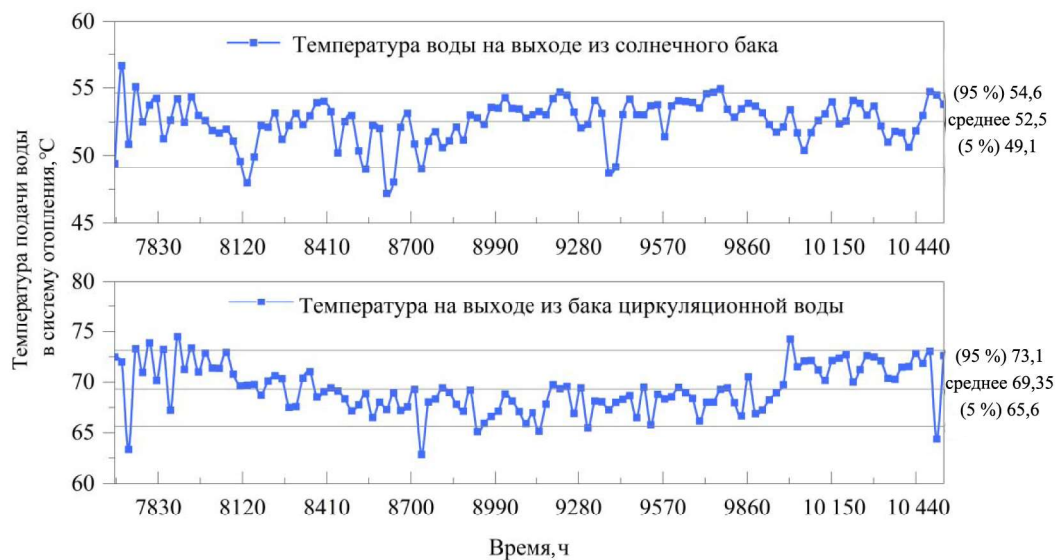


Рис. 7. Распределение температуры горячей воды на выходе из солнечных теплоаккумуляторов и рециркуляционных баков в течение отопительного сезона

на выходе из циркуляционного бака превышает $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Пройдет некоторое время, прежде чем температура воды в баке-аккумуляторе солнечной батареи снова достигнет заданной температуры нагрева. Поэтому до тех пор, пока температура в баке-аккумуляторе не достигнет $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, в системе используется циркуляционный бак. После этого произойдет переход на режим нагрева солнечной подсистемы. В условиях низкой нагрузки на подсистему частичной газификации биомассы приходится всего 47,9 % тепловой нагрузки из-за непродолжительного времени работы.

В условиях максимальной нагрузки средняя температура составила $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, средняя интенсивность солнечной радиации — $283,7\text{ Вт/м}^2$, средняя тепловая нагрузка — $2724,3\text{ Вт}$. Несмотря на то что солнечная тепловая мощность в этом случае недостаточна, теплота, генерируемая частично газифицированными подсистемами биомассы, аккумулированными в резервуарах циркуляционной воды, по-прежнему обеспечивает тепловую нагрузку в течение большей части времени. Таким образом, подсистема газификации биомассы обеспечивает боль-

шую часть тепловой нагрузки (94,4 %). Доля солнечной энергии составляет 5,6 %. Кроме того, на рис. 8 показаны почасовые тепловые характеристики комбинированной системы отопления в типичные дни минимальной и максимальной нагрузки соответственно.

Средние значения тепловой эффективности солнечных подсистем составили 42,77 % и 34,79 % соответственно. При работе подсистемы частичной газификации биомассы резервуар с циркуляционной водой продолжает поглощать теплоту, в результате чего температура воды повышается, что приводит к снижению тепловой эффективности подсистемы частичной газификации биомассы и общей тепловой эффективности системы.

Выводы

Сравнивая работу HBSHS в дни с низкой и высокой отопительной нагрузкой, можно увидеть, что в начале отопительного сезона солнечная энергия может удовлетворить до 52,1 % нагрузки. Но в условиях высокой отопительной нагрузки солнечная подсистема может обеспечить лишь 5,6 % потребности. Большая часть тепловой нагрузки (94,4 %) будет обеспечиваться частично газифицированной подсистемой биомассы. Бак циркуля-

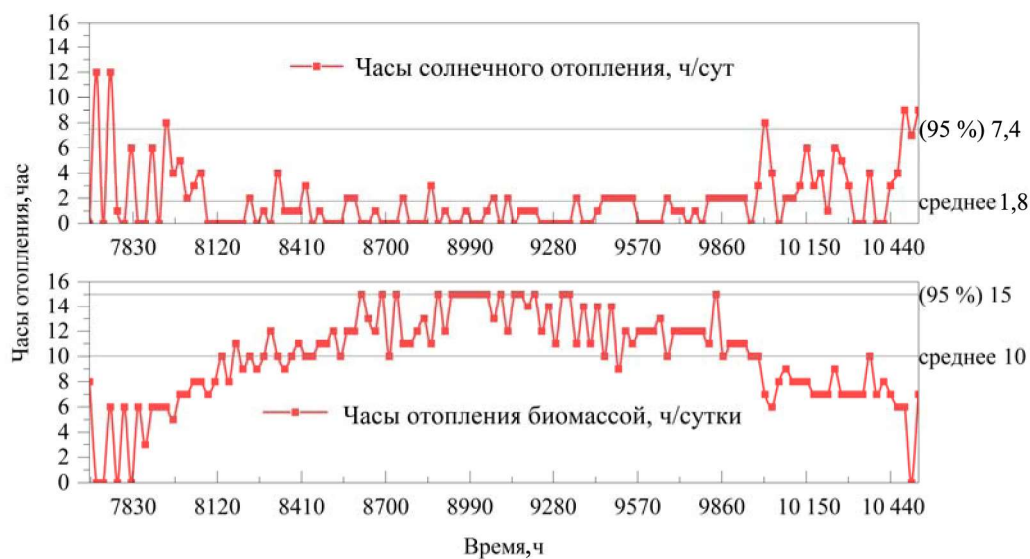


Рис. 8. Распределение часов работы солнечной и биомассовой подсистем в течение отопительного сезона

ционной воды, поглощая и отдавая теплоту, играет важную роль в устранении переходных дисбалансов выработки и потребления тепловой энергии. Кроме того, сравнение эффективности работы HBSHS в дни низкой и высокой нагрузки показывает, что тепловая эффективность системы увеличивается при понижении температуры циркуляционной воды.

Библиографический список

1. Weng Y., Cai W., Wang C. Evaluating the use of BECCS and afforestation under China's carbon-neutral target for 2060 // *Applied Energy* 2021; 299:117263. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117263>
2. Ren M., Lu P., Liu X., Hossain M., Fang Y., Hanaoka T., et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality // *Applied Energy* 2021; 298:117209. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117209>
3. Данные о производстве и потреблении энергии в Китае в 2022 году. URL: https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202303/t20230302_1350587.html
4. Yun X., Meng W., Xu H., Zhang W., Yu X., Shen H., et al. Coal is dirty, but where it is burned especially matters // *Environmental Science & Technology* 2021; 55:7316–26. URL: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01148>
5. Hayat M. B., Ali D., Monyake K. C., Alagha L., Ahmed N. Solar energy — A look into power generation,

challenges, and a solar-powered future // *International Journal of Energy Research* 2019; 43:1049–67. URL: <https://doi.org/10.1002/er.4252>

6. Mofijur M., Mahlia T. M. I., Silitonga A. S., Ong H. C., Silakhori M., Hasan M. H., et al. Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview // *Energies* 2019; 12:3167. URL: <https://doi.org/10.3390/en12163167>

7. Hobbi A., Siddiqui K. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS // *Solar Energy* 2009; 83:700–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.018>

8. Yanhua L., Wengang H., Hongwen Y., Mingxin L. Performance and economic evaluation of evacuated tube solar collector with auxiliary electric heater for rural heating // *Energy Procedia* 2019; 158:186–91. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.068>

9. Lugo S., García-Valladares O., Best R., Hernández J., Hernández F. Numerical simulation and experimental validation of an evacuated solar collector heating system with gas boiler backup for industrial process heating in warm climates // *Renewable Energy* 2019; 139:1120–32. URL: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.136>

10. Zhang T., Wang F., Gao Y., Liu Y., Guo Q., Zhao Q. Optimization of a solar-air source heat pump system in the high-cold and high-altitude area of China // *Energy* 2023; 268:126653. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.126653>

11. Aste N., Caputo P., Del Pero C., Ferla G., Huerto-Cardenas H. E., Leonforte F., et al. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: Biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system // *Energy* 2020; 206:118091. URL:

<http://doi:10.1016/j.energy.2020.118091>

12. Gaballah E. S., Abdelkader T. K., Luo S., Yuan Q., Abomohra A. E.-F. Enhancement of biogas production by integrated solar heating system: A pilot study using tubular digester // *Energy* 2020; 193:116758. URL: <http://doi:10.1016/j.energy.2019.116758>

13. Zhang Y., Zhang Z., Zhou Y., Dong R. The influences of various testing conditions on the evaluation of household biomass pellet fuel combustion // *Energy* 2018; 11:1131. URL: <http://doi:10.3390/en11051131>

14. Wang Z., Zhang B., Qi G. Research Status and Analysis of Biomass Pyrolysis Gasification Technology // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 2020;721: 012075. URL: <http://doi:10.1088/1757-899X/721/1/012075>

15. Кулагина В. А., Дунаева Н. В., Яковлева Д. Д. Новые технологии использования биогаза как способ решения экологических проблем // *Вестник Российской академии наук*. 2021. Т. 91, № 1. С. 87–102.

16. Umeda K., Nakamura S., Lu D., Yoshikawa K. Biomass gasification employing low-temperature carbonization pretreatment for tar reduction // *Biomass and Bioenergy* 2019; 126:142–149. URL: <http://doi:10.1016/j.biombioe.2019.05.002>

17. Ahmad M., Jabeen G. Biogas technology adoption and household welfare perspectives for sustainable development // *Energy Policy* 2023; 181:113728. URL: <http://doi:10.1016/j.enpol.2023.113728>

18. Hassan M., Usman N., Hussain M., Yousaf A., Khattak M. A., Yousaf S., et al. Environmental and Socio-Economic Assessment of Biomass Pellets Biofuel in Hazara Division, Pakistan // *Sustainability* 2023;15:12089. URL: <http://doi:10.3390/su151512089>

19. Cortazar M., Santamaria L., Lopez G., Alvarez J., Zhang L., Wang R., et al. A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification // *Energy Conversion and Management* 2023;276:116496. URL: <http://doi:10.1016/j.enconman.2022.116496>

20. Darwesh M., Ghoname M. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units // *Energy Reports* 2021;7:1657–71. URL: <http://doi:10.1016/j.egyr.2021.03.014>

21. Zhang X., Yang J., Zhao X. Optimal study of the rural house space heating systems employing the AHP and FCE methods // *Energy* 2018;150:631–41. URL: <http://doi:10.1016/j.energy.2018.03.007>

22. Lundgren J., Hermansson R. Solar assisted small-scale biomass district heating system in the northern part of Sweden // *International Journal of Green Energy* 2005;1:467–82. URL: <http://doi:10.1081/GE-200038715>

23. Khalid F., Dincer I., Rosen M. A. Thermoeconomic analysis of a solar-biomass integrated multigeneration system for a community // *Applied Thermal*

Engineering 2017;120:645–53. URL: <http://doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.040>

24. Chen Y., Guo M., Liu Y., Wang D., Zhuang Z., Quan M. Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas // *Energy Conversion and Management* 2023;276:116591. URL: <http://doi:10.1016/j.enconman.2022.116591>

25. Prasartkaew B., Kumar S. A low carbon cooling system using renewable energy resources and technologies // *Energy and Buildings* 2010; 42:1453–62. URL: <http://doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.015>

26. Cheng J., Zhang C., Sun J., Qiu L. Assessing the sustainable abilities of a pilot hybrid solar-pyrolysis energy system using energy synthesis // *International Journal of Energy Research* 2020; 44:2909–24. URL: <http://doi:10.1002/er.5110>

27. Cheng J., Zhang C., Sun J., Qiu L. Sustainability accounting for the construction and operation of a plant-scale solar- biogas heating system based on energy analysis // *International Journal of Energy Research* 2019;1–17. URL: <https://doi:10.1002/er.4543>

28. Transient Systems Simulation Program. URL: <https://ru.freownloadmanager.org/Windows-PC/TRNSYS.html>

References

1. Weng Y., Cai W., Wang C. Evaluating the use of BECCS and afforestation under China's carbon-neutral target for 2060. *Applied Energy*, 2021; 299:117263. Available at: <https://doi:10.1016/j.apenergy.2021.117263>

2. Ren M., Lu P., Liu X., Hossain M., Fang Y., Hanaoka T., et al. De-carbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality. *Applied Energy*, 2021; 298:117209. Available at: <https://doi:10.1016/j.apenergy.2021.117209>

3. Dannye o proizvodstve i potreblenii energii v Kitae v 2022 godu [Data on energy production and consumption in China in 2022]. Available at: https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202303/t20230302_1350587.html

4. Yun X., Meng W., Xu H., Zhang W., Yu X., Shen H., et al. Coal is dirty, but where it is burned especially matters. *Environmental Science & Technology*, 2021; 55:7316–26. Available at: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01148>

5. Hayat M. B., Ali D., Monyake K. C., Alagha L., Ahmed N. Solar energy — A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*, 2019; 43:1049–67. Available at: <https://doi:10.1002/er.4252>

6. Mofijur M., Mahlia T. M. I., Silitonga A. S., Ong H. C., Silakhori M., Hasan M. H., et al. Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage. Overview.

Energies, 2019; 12:3167. Available at: <https://doi:10.3390/en12163167>

7. Hobbi A., Siddiqui K. Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solar Energy*, 2009; 83:700–14. Available at: <https://doi:10.1016/j.solener.2008.10.018>

8. Yanhua L., Wengang H., Hongwen Y., Mingxin L. Performance and economic evaluation of evacuated tube solar collector with auxiliary electric heater for rural heating. *Energy Procedia*, 2019; 158:186–91. Available at: <https://doi:10.1016/j.egypro.2019.01.068>

9. Lugo S., García-Valladares O., Best R., Hernández J., Hernández F. Numerical simulation and experimental validation of an evacuated solar collector heating system with gas boiler backup for industrial process heating in warm climates. *Renewable Energy*, 2019; 139:1120–32. Available at: <http://doi:10.1016/j.renene.2019.02.136>

10. Zhang T., Wang F., Gao Y., Liu Y., Guo Q., Zhao Q. Optimization of a solar-air source heat pump system in the high-cold and high-altitude area of China. *Energy*, 2023; 268:126653. Available at: <https://doi:10.1016/j.energy.2023.126653>

11. Aste N., Caputo P., Del Pero C., Ferla G., Huerto-Cardenas H. E., Leonforte F., et al. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: Biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system. *Energy*, 2020; 206:118091. Available at: <http://doi:10.1016/j.energy.2020.118091>

12. Gaballah E. S., Abdelkader T. K., Luo S., Yuan Q., Abomohra A. E.-F. Enhancement of biogas production by integrated solar heating system: A pilot study using tubular digester. *Energy*, 2020; 193:116758. Available at: <http://doi:10.1016/j.energy.2019.116758>

13. Zhang Y., Zhang Z., Zhou Y., Dong R. The influences of various testing conditions on the evaluation of household biomass pellet fuel combustion. *Energy*, 2018; 11:1131. Available at: <http://doi:10.3390/en11051131>

14. Wang Z., Zhang B., Qi G. Research Status and Analysis of Biomass Pyrolysis Gasification Technology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020; 721: 012075. Available at: <http://doi:10.1088/1757-899X/721/1/012075>

15. Kulagina V. A., Dunaeva N. V., Yakovleva D. D. *Novye tekhnologii ispol'zovaniya biogaza kak sposob resheniya ekologicheskikh problem* [New technologies of biogas utilization as a way to solve environmental problem]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk – Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2021, vol. 91, no. 1, pp. 87–102.

16. Umeda K., Nakamura S., Lu D., Yoshikawa K. Biomass gasification employing low-temperature carbonization pretreatment for tar reduction. *Biomass and Bioenergy*, 2019; 126:142–149. Available at: <http://doi:10.1016/j.biombioe.2019.05.002>

17. Ahmad M., Jabeen G. Biogas technology adoption and household welfare perspectives for sustainable development. *Energy Policy*, 2023; 181:113728. Available at: <http://doi:10.1016/j.enpol.2023.113728>

18. Hassan M., Usman N., Hussain M., Yousaf A., Khattak M. A., Yousaf S., et al. Environmental and Socio-Economic Assessment of Biomass Pellets Biofuel in Hazara Division, Pakistan. *Sustainability*, 2023; 15:12089. Available at: <http://doi:10.3390/su151512089>

19. Cortazar M., Santamaria L., Lopez G., Alvarez J., Zhang L., Wang R., et al. A comprehensive review of primary strategies for tar removal in biomass gasification. *Energy Conversion and Management*, 2023; 276:116496. Available at: <http://doi:10.1016/j.enconman.2022.116496>

20. Darwesh M., Ghoname M. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021; 7:1657–71. Available at: <http://doi:10.1016/j.egyr.2021.03.014>

21. Zhang X., Yang J., Zhao X. Optimal study of the rural house space heating systems employing the AHP and FCE methods. *Energy*, 2018; 150:631–41. Available at: <http://doi:10.1016/j.energy.2018.03.007>

22. Lundgren J., Hermansson R. Solar assisted small-scale biomass district heating system in the northern part of Sweden. *International Journal of Green Energy*, 2005; 1:467–82. Available at: <http://doi:10.1081/GE-200038715>

23. Khalid F., Dincer I., Rosen M. A. Thermo-economic analysis of a solar-biomass integrated multi-generation system for a community. *Applied Thermal Engineering*, 2017; 120:645–53. Available at: <http://doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.03.040>

24. Chen Y., Guo M., Liu Y., Wang D., Zhuang Z., Quan M. Energy, exergy, and economic analysis of a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas. *Energy Conversion and Management*, 2023; 276:116591. Available at: <http://doi:10.1016/j.enconman.2022.116591>

25. Prasartkaew B., Kumar S. A low carbon cooling system using renewable energy resources and technologies. *Energy and Building*, 2010; 42:1453–62. Available at: <http://doi:10.1016/j.enbuild.2010.03.015>

26. Cheng J., Zhang C., Sun J., Qiu L. Assessing the sustainable abilities of a pilot hybrid solar-pyrolysis energy system using energy synthesis. *International Journal of Energy Research*, 2020; 44:2909–24. Available at: <http://doi:10.1002/er.5110>

27. Cheng J., Zhang C., Sun J., Qiu L. Sustainability accounting for the construction and operation of a plant scale solar bio-gas-heating system based on energy analysis. *International Journal of Energy Research*, 2019; 1–17. Available at: <https://doi:10.1002/er.4543>

28. *Transient System Simulation Program*. Available at: <https://ru.freownloadmanager.org/Windows-PC/TRNSYS.html>