



ПАРОКОМПРЕССИОННАЯ СИСТЕМА КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА С СОЛНЕЧНЫМ ТЕПЛОВЫМ КОЛЛЕКТОРОМ

Аль-Окби А.К.^{1,2}, Ваньков Ю.В.²

¹University of Technology, Iraq, Baghdad

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

ahmedkhaleel18@yahoo.com, yvankov@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ Системы кондиционирования воздуха в Ираке потребляют более половины выработки электроэнергии. Летом, когда температура повышается, спрос на использование кондиционеров увеличивается, что приводит к постоянным перебоям в подаче электроэнергии. Потребители начинают использовать местную генерацию - дизель-генераторы, которые увеличивают загрязнение окружающей среды. ЦЕЛЬ. Тепловая энергия, поступающая от солнца, является идеальным решением для снижения потребления электроэнергии, повышения производительности кондиционеров, обеспечения непрерывности электроснабжения и снижения загрязнения окружающей среды от дизельных генераторов и электростанций, а также для экономии энергии и сокращения потребления ископаемого топлива.

МЕТОДЫ. При решении поставленной задачи применялись методы термодинамического анализа, экспериментальные методы исследования. Выполнено теоретическое и экспериментальное сравнение вариантов работы стандартной и гибридной (использующей солнечную тепловую энергию) систем кондиционирования. Определены тепловые параметры и уровень потребления электроэнергии исследуемых систем. РЕЗУЛЬТАТЫ исследования показали, что гибридная система кондиционирования воздуха, использующая солнечную тепловую энергию, эффективнее, чем традиционная парокомпрессионная система, так как увеличивает холодильный коэффициент на (38,9 – 46,3%) и снижает потребление электроэнергии на (56,89 – 66,66%). Проведена оценка положительного эффекта от внедрения разработанных систем. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Использование гибридных парокомпрессионных систем в климатических условиях г. Багдада приведет к существенному снижению потребления электрической энергии системами кондиционирования за счет повышения холодопроизводительности систем, что приведет к повышению надежности энергоснабжения, исключению необходимости использования местных дизель-генераторов.

Ключевые слова: гибридная энергетика, энергосбережение, солнечная энергия, системы кондиционирования, солнечный коллектор.

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств госзадания № 075-03-2023-291 от 16.01.2023 года.

Для цитирования: Аль-Окби А.К., Ваньков Ю.В. Парокомпрессионная система кондиционирования воздуха с солнечным тепловым коллектором // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 5. С. 101 – 114. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-101 – 114.

VAPOR COMPRESSION AIR CONDITIONING SYSTEM WITH SOLAR HEAT COLLECTOR

Al-Okbi^{1,2} A.K., Vankov² Yu.V.

¹University of Technology, Iraq, Baghdad,

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

ahmedkhaleel18@yahoo.com, yvankov@mail.ru

Abstract: *THE RELEVANCE* of the study lies in the fact that air conditioning systems in Iraq consume more than half of the electricity generation. During the summer, when temperatures rise, the demand for air conditioning increases, resulting in constant power outages. Consumers are starting to use local generation - diesel generators, which increase environmental pollution. *THE PURPOSE.* Consider the problems thermal energy from the sun is an ideal solution for reducing electricity consumption, increasing the performance of air conditioners, ensuring continuity of power supply and reducing pollution from diesel generators and power plants, as well as saving energy and reducing the consumption of fossil fuels. *METHODS.* When solving the problem, a comparison of options for standard and (hybrid using solar thermal energy) air conditioning systems was used. In a hybrid system, thermal energy enters the system from a solar collector built behind the compressor. Thermal parameters and level of electricity consumption were calculated. *RESULTS.* The article showed that a hybrid air conditioning system using solar thermal energy is more efficient than a traditional system, as it increases the cooling coefficient by (38.9 - 46.3%) and reduces electricity consumption by (56.89 - 66.66). %. *CONCLUSION.* The use of a hybrid air conditioning system in the climate of Baghdad city with a vapor compression air conditioning system reduced the electrical energy consumption of the compressor and increased the performance of the system, which will lead to increased reliability of power supply and eliminate the need to use local diesel generators.

Keywords: hybrid energy, energy savings, solar energy, solar air conditioner, pollution reduction.

Acknowledgements: The study was carried out at the expense of state task No. 075-03-2023-291 dated 01/16/2023.

For citation: Al-Okbi A.K., Vankov Yu.V. Vapor compression air conditioning system with solar heat collector. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25 (5): 101-114. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-5-101-114.

Введение (Introduction)

Кондиционирование представляет собой процесс поддержания температуры, относительной влажности в помещении путем отвода тепла и удаления нежелательной влаги посредством технических средств для обеспечения комфортных параметров микроклимата в соответствии с требованиями [1-2].

Наиболее распространенными и широко используемыми являются парокомпрессионные холодильные системы из-за своей высокой производительности, простоты установки и обслуживания. Однако они обладают и существенным недостатком - потребляют большое количество электроэнергии [3-4].

В Ираке, а также в тропических и субтропических регионах других стран из-за высоких температур в летнее время системы кондиционирования потребляют более половины выработанной электроэнергии, что влияет на стабильность и непрерывность энергоснабжения. При отключении электроэнергии в результате нагрузки на сеть, потребители вынуждены применять местные дизель-генераторы.

Большое потребление электроэнергии приводит к потреблению большого количества топлива и, таким образом, увеличивает выбросы парниковых газов в окружающую среду [5-6].

Практическая значимость исследования заключается в том что одним из вариантов решения проблемы повышения надежности энергоснабжения является использование тепловой энергии Солнца при работе систем кондиционирования воздуха. Добавление в рабочий цикл парокомпрессионной системы кондиционирования тепловой энергии от солнечного коллектора приведет к повышению холодопроизводительности системы, уменьшению необходимой мощности электрической энергии на привод компрессора [7-10].

Целью настоящего исследования является снижение потребления электроэнергии в системах кондиционирования воздуха при одновременном повышении их производительности, путем использования тепловой энергии солнечного излучения.

Литературный обзор (Literature Review)

Вопросам использования энергии солнца для систем охлаждения посвящено большое количество работ, что говорит об актуальности данной темы.

В статье [11] *Li Huang* с соавторами, представили исследование комбинированной системы солнечного отопления и охлаждения с двумя воздушными тепловыми насосами. Система установлена в г. Нинбо, Китай, находится в эксплуатации с 2018 года. Состоит из сорока вакуумных трубчатых модулей площадью 120 м², абсорбционного охладителя на водном растворе *LiBr* холодопроизводительностью 35 кВт. Установлено, что производительность системы увеличилась более чем на 40%, после того, как солнечная система охлаждения и отопления была объединена с тепловыми насосами, а средний холодильный коэффициент (*COP*) для абсорбционного охладителя колебался между 0,68 до 0,76. Годовая экономия электроэнергии составила 41,1% от общего потребления электроэнергии на охлаждение и отопление зданий.

S.M. Xu с соавторами [12] представили исследование новой абсорбционной системы охлаждения, работающей от солнечной энергии, с технологией накопления химической энергии в материале *LiBr-H₂O* и последующего ее преобразования в тепловую энергию путем абсорбционного охлаждения. Результаты анализа показали, что холодильный коэффициент установки составляет 0,753 при охлаждении воздухом и 0,756 при охлаждении водой, а удельная плотность накопления энергии составила 368,5 МДж/м³.

Mehmet Bilgili [13] провел исследование солнечной электрической парокомпрессионной холодильной системы (*SE-VCR*) в городе Адана (Турция). Система состоит из фотоэлектрической солнечной панели, электрического аккумулятора, двигателя постоянного тока, инвертора. Испытания проводились в мае, июне, июле, августе и сентябре. Максимальная потребляемая мощность компрессора 2,53 кВт была получена в 15:00 23 августа. Площадь поверхности фотоэлектрической панели составляла 31,26 квадратных метра.

Nwasuka N. C. с соавторами [14] провели сравнение солнечной гибридной системы кондиционирования воздуха и обычной системы кондиционирования воздуха с точки зрения получения низких температур в кондиционируемом помещении, результаты показали, что комнатные температуры полученные с солнечной гибридной системой кондиционирования воздуха ниже, чем температуры достигнутые обычной системой, что доказывает большую эффективность гибридной системы.

Anita Preisler с соавторами [15] исследовали систему испарительного охлаждения с осушителем на солнечной энергии и сравнили ее с традиционной системой с точки зрения экономии энергии. Результаты показали, что система испарительного охлаждения с осушителем на солнечной энергии экономит 73,9% электрической энергии зимой и 18,2% летом по сравнению с традиционной системой. Авторы отметили, что эту систему можно использовать в южной Европе, где уровень энергосбережения может достичь 50% потребления традиционной системы.

Abdenour Bouraba с соавторами [16] представили теоретическое исследование, включающее сравнение традиционного кондиционера воздуха и кондиционера, работающего с солнечным тепловым коллектором, содержащим теплообменник в виде змеевика. Критериями сравнения были холодильный коэффициент, степень сжатия, площадь поверхности конденсатора, а также температура теплоносителя, выходящего из змеевика. Система исследовалась с разными хладагентами (*R-1234ze (E)*, *R-134a* и *R-410A*). Результаты показали, что хладагент *R-1234ze (E)* имеет результаты лучше, чем хладагенты *R-134a* и *R-410A* по температурам на выходе из компрессора.

M. Khalaji Assadi в работе [17] использовал тепловой коллектор, состоящий из U-образной системы солнечных вакуумных трубок и объединил его с кондиционерами воздуха различной мощности от 2,93 кВт до 7,034 кВт с целью снижения потребления электроэнергии путем замены компрессора другим компрессором, работающем на постоянном токе. Анализ тепловых характеристик проводился с использованием программы *ANSYS-FLUENT*. Результаты показали, что сочетание солнечного коллектора системой кондиционирования воздуха с компрессором постоянного тока позволяет снизить потребление энергии на 45%.

Материалы и методы (Materials and methods)

Схема гибридной системы охлаждения: Традиционная система реализующая парокомпрессионный холодильный цикл состоит из испарителя, компрессора, конденсатора и расширительного клапана. Компрессор является основной частью системы и потребляет большое количество электроэнергии для создания в системе давления, необходимого для перемещения хладагента по магистрали. Предлагаемая система гибридного холодильного цикла отличается от традиционной системы добавлением в систему солнечного теплового коллектора в части, следующей за

компрессором как показано на рисунке 1. Коллектор поглощает солнечную радиацию, энергия которой идет на нагрев теплоносителя (воды) в баке, который в свою очередь посредством змеевикового теплообменника повышает температуру и давление хладагента поступающего в конденсатор.

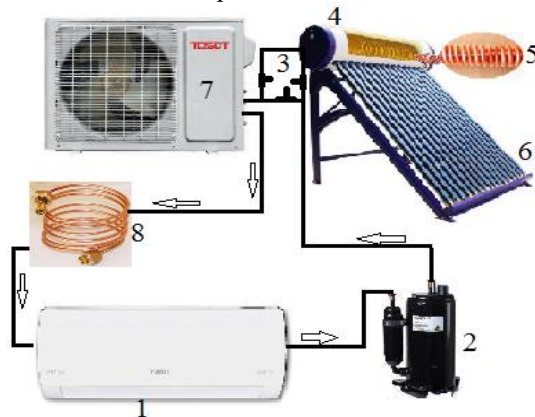


Рис. 1. Принципиальная схема компонентов гибридной системы кондиционирования воздуха 1 – Испаритель прямого расширения; 2 – Компрессор; 3 – Запорная арматура; 4 – Резервуар для горячей воды; 5 – Змеевик; 6 – Вакуумный солнечный коллектор; 7 – Конденсатор; 8 – Капиллярная трубка

Fig. 1. Schematic diagram of the components of the hybrid air conditioning system 1 – Direct expansion evaporator; 2 – Compressor; 3 – Shut-off valves; 4 – Hot water tank; 5 – Heat exchanger coil; 6 – Vacuum tube solar collector; 7 – condenser; 8 – Capillary tube

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

При расчете параметров рабочего тела в характерных точках цикла (рис.2) давления и температуры принимались по термодинамическим таблицам для хладагента R-410a. Тепловые параметры рассчитывались по следующим уравнениям:

$$Q_o = m r^{\circ} (h_1 - h_5) \quad (1)$$

$$l_k = m r^{\circ} (h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$Q_{c.k.} = m r^{\circ} (h_3 - h_2) \quad (3)$$

$$Q = m r^{\circ} (h_3 - h_4) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{l_k} \quad (5)$$

$$N_{эл} = I * V * PF \quad (6)$$

$$EER = Q_o / N_{эл} \quad (7)$$

$$SEER = EER / 0.9 \quad (8)$$

где h – энтальпии в соответствующих точках цикла (кДж/кг);

$m r$ – массовый расход (кг/с);

Q_o – холодопроизводительность (кВт);

Q – мощность конденсатора (кВт);

$Q_{c.k.}$ – тепловая энергия солнца добавляемая в систему (кВт);

l_k – работа компрессора (кВт);

ε – холодильный коэффициент;

$N_{эл}$ – потребляемая мощность компрессора (кВт);

I – Ток (А), V – Напряжение (В), PF – Коэффициент мощности;

EER – коэффициент энергоэффективности;

$SEER$ – сезонный коэффициент энергоэффективности.

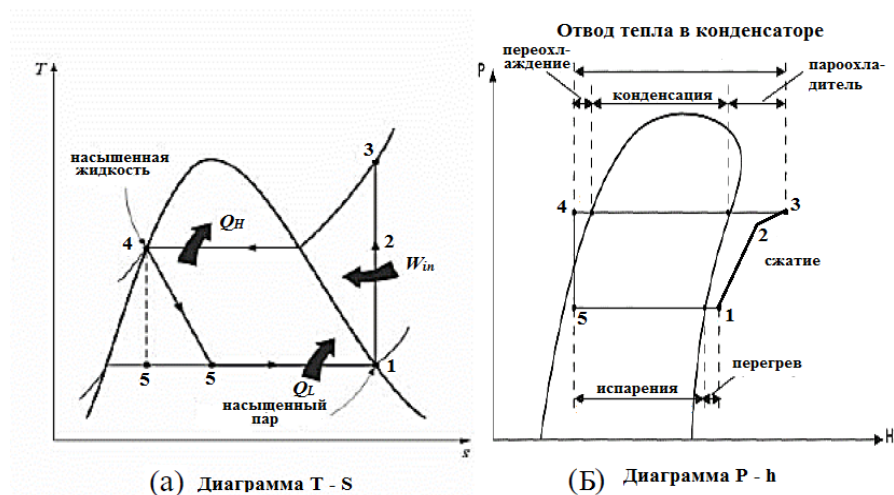


Рис. 2. T-s и p-h диаграмма парокompрессионного холодильного цикла

Fig. 2. T-s and p-h diagram of vapor compression refrigeration cycle

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Описание работы системы: Гибридная система кондиционирования отличается от традиционной системы, добавлением элементов, позволяющих использовать солнечную тепловую энергию с целью энергосбережения (рис. 3). Основные компоненты системы гибридного цикла охлаждения: компрессор, конденсатор, расширительный клапан, испаритель и солнечный коллектор с запорной арматурой. Клапан и запорная арматура позволяют регулировать цикл охлаждения и изучать работу системы с солнечным коллектором или без него.

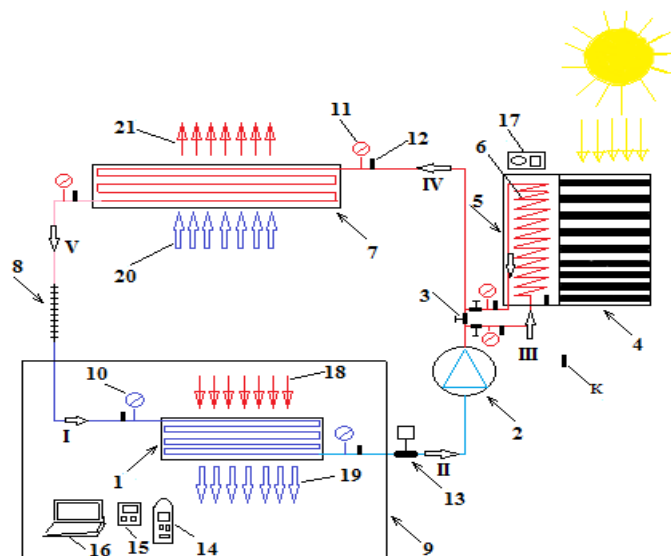


Рис. 3. Принципиальная схема солнечной системы охлаждения. I – V Направление движения теплоносителя в системе; 1 – Испаритель; 2 – компрессор; 3 – запорная арматура; 4 – вакуумный солнечный коллектор; 5 – резервуар горячей воды; 6 – змеевик; 7 – конденсатор с воздушным охлаждением; 8 – капиллярная трубка; 9 – кондиционируемое помещение; 10 – манометр низкого давления; 11 – манометр высокого давления; 12 – датчики температуры; 13 – турбинный расходомер; 14 – цифровой измеритель мощности; 15 – регистратор данных; 16 – персональный компьютер; 17 – цифровой фотометр; 18 – теплый воздух из помещения; 19 – охлажденный воздух; 20 –

всасываемый наружный воздух; 21 – выдуваемый подогретый воздух
Fig. 3. Schematic diagram of a solar cooling system. I – V Direction of coolant movement in the system; 1 – Evaporator; 2 – Compressor; 3 – Shut-off valves; 4 – Vacuum tube solar collector; 5 – Hot water storage tank; 6 – Heat exchanger coil; 7 – Air-cooled condenser; 8 – Capillary tube; 9 – Air-conditioned room; 10 – Low pressure gauge; 11 – High pressure gauge; 12 – Temperature sensors; 13 – Turbine flow meter; 14 – Digital power meter; 15 – Data logger; 16 – Personal computer; 17 – Digital photometer; 18 – Warm air from the room; 19 – Cooled air; 20 – Sucked in outside air; 21 – Blown out heated air

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Система состоит из:

1. Помещения для проведения испытаний объемом 30 м³ (4 х 2,5 х 3 м).
2. Кондиционера сплит-системы «Tosot» холодопроизводительностью 7,034 кВт.
3. Вакуумного солнечного теплового коллектора трубчатого типа.
4. Комплекта измерительных, датчиков и регистратора данных (ноутбук).

На рисунке 4 показана фотография кондиционируемого помещения с внутренним блоком. Испарителем является теплообменник из медных труб, с алюминиевыми ребрами с медным покрытием, к которому подключены измерительные приборы, датчики и регистратор данных с ноутбуком.

На рисунке 5 представлена фотография наружного блока кондиционера, соединенного с солнечным тепловым коллектором. Наружный блок состоит из медного теплообменника с воздушным охлаждением и алюминиевых ребер с медным покрытием. Магистраль между внутренней и внешней частями системы выполнена из медных трубок. Солнечный тепловой коллектор площадью 1,69 м² установлен на крыше здания. Змеевик теплообменника гибридного холодильного цикла установлен за компрессором. Он нагревает хладагент, выходящий из компрессора, горячей водой, находящейся внутри теплоизолированного бака солнечного теплового коллектора.



Рис. 4. Фотография кондиционируемого помещения с внутренним блоком

Fig. 4. Photo of an air-conditioned room with an indoor unit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author



Рис. 5. Наружный блок и солнечный коллектор

Fig. 5. Outdoor unit and solar collector

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Компрессор производства ZHUHAI LANDA, используемый в традиционном холодильном цикле имел холодопроизводительность 7,034 кВт. С целью экономии электрической энергии за счет использования солнечной энергии во время испытаний он был заменен компрессором меньшей холодопроизводительности 4,44 кВт производства HIGHLY. Запорная арматура, установленная после компрессора, позволяют исследовать характеристики работы системы в традиционном парокompрессионном холодильном цикле и в режиме работы гибридной системы с добавлением солнечного теплового коллектора.

В процессе проведения исследований солнечный тепловой коллектор имел ориентацию на юг с углом наклона 45 градусов. Технические характеристики

испытательного стенда приведены в таблице 1.

При проведении экспериментов на испытательном стенде использовались поверенные высокоточные измерительные приборы и датчики: восемь термодатчиков К-типа установлены, как показано на рис.2; регистратор данных *HUATO S220 -T8* (записывает данные в виде таблицы *Microsoft Excel* на ноутбук в заданный промежуток времени); цифровой измеритель мощности *UT233* для измерения напряжения, тока и потребляемой мощности; шесть манометров типа *Borden (BTC)*; анемометр *MS6252B* для измерения расхода воздуха через испаритель и конденсатор, температуры окружающей среды и относительной влажности; расходомер *CM-15-63* для измерения расхода хладагента в системе; цифровой фотометр *VICTOR 1010D* для измерения характеристик излучения, падающего на солнечный коллектор. При монтаже стенда применялся вакуумный насос, после проверки на герметичность система была заправлена хладагентом *R-410A* массой 1800 г.

Таблица 1

Table 1

Технические характеристики испытательного стенда

Technical characteristics of the test bench

Кондиционер: Тип (<i>Tosot</i>), модель (<i>Moon Series, TS-H246OZM3</i>), компрессор тип (роторный), источник питания (220 – 240 В/ 1 Ф/ 50 Гц), холодопроизводительность (7,034 кВт/ч), Ток (10 А), мощность (2040 – 2180 Вт), хладагент тип (<i>R-410A</i>), масса (1800г), тип расширения (капиллярная трубка)
Конденсатор Тип (медные трубы, алюминиевые плоские ребра), длина трубки (87 см), количество трубок (60)
Испаритель Тип (медные трубы, алюминиевые плоские ребра), длина трубки (86 см), количество трубок (40), расход воздуха (1250 м ³ /ч)
Резервуар Диаметр (42см), длина (139см), емкость накопителя (193 л)
Солнечный коллектор Количество трубок (18), внутренний диаметр (3,7 см), Внешний диаметр (4,7 см), расстояние между трубками (0,5 см), длина трубки (150 см), рабочая длина трубки (137 см)
Змеевик внутри резервуара Материал (медь), вид (спираль), диаметр трубки (½ дюйма), диаметр спирали (14 см), количество витков (35)
Запорная арматура Количество (3), тип (Задвижки, медные), диаметр (½ дюйма)
Магистраль Трубка от компрессора к резервуару - длина (115 см), диаметр (½ дюйма), Трубка от резервуара к конденсатору - длина (120 см), диаметр (½ дюйма), Трубка от капиллярной трубки к испарителю - длина (480 см), диаметр (¼ дюйма), Трубка от испарителя к компрессору - длина (480 см), диаметр (5/8 дюйма)
Технические характеристики альтернативного компрессора Модель (<i>ASH184TV</i>), Водоизмещение (18,4 см ³ /обо), Холодопроизводительность (4440w), Конденсатор (40Hf/450v), Высота (293,5mm), Условия испытаний (<i>ASHRAE/T</i>) [18]

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author*

После монтажа системы проведены полевые испытания в г. Багдаде. Измеренные данные были записаны для последующего анализа с использованием программы *CoolPack*. Программа позволяет проводить расчет необходимых тепловых параметров и проводить сравнение разных режимов работы стенда с точки зрения производительности и энергопотребления.

Результаты (Results)

Исследования производительности и энергопотребления разработанной системы проводились в четырех режимах – с солнечным тепловым коллектором (два режима) и без него (два режима).

Первый режим представляет собой традиционную систему компрессионного холодильного цикла с компрессором холодопроизводительности 7,034 кВт; второй режим представляет собой гибридную компрессионную холодильную систему с компрессором холодопроизводительности 7,034 кВт; третий режим представляет собой традиционную систему компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора холодопроизводительностью 4,44 кВт; четвертый режим представляет собой систему гибридного компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора холодопроизводительностью 4,44 кВт.

Сравнение системы охлаждения с вакуумным солнечным коллектором и без него

После исследования работы системы в четырех режимах с солнечным тепловым коллектором и без него с компрессором 7,034 кВт и 4,44 кВт, были получены данные представленные на рисунках 6-11.

На рисунке 6 представлена потребляемая мощность компрессора. Из него следует, что потребляемая компрессором энергия в первом и втором режимах, выше, чем в третьем и четвертом, причина в том, что компрессор, используемый в цикле, имеет большие габариты по сравнению с третьим и четвертым режимами и затрачивает большее количество энергии, для выполнения необходимой работы в цикле. В третьем и четвертом режимах он потребляет меньше энергии, поскольку используемый компрессор имеет небольшие размеры, а добавленная в цикл тепловая энергия позволяет снизить работу компрессора на втором и четвертом режимах.

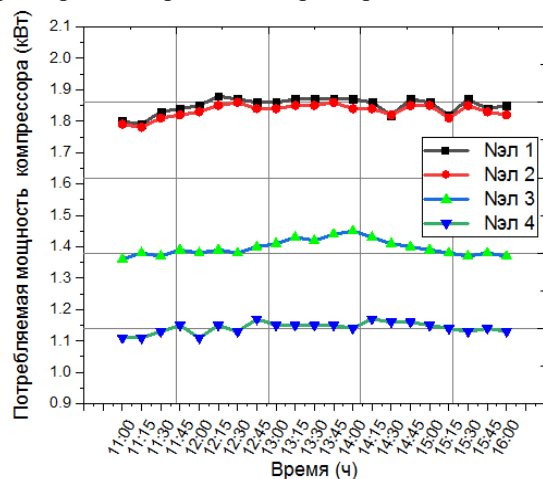


Рис. 6. Потребляемая мощность компрессора

Fig. 6. Compressor power consumption

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 7 показана мощность конденсатора в период максимума нагрузки с 11 до 16 часов дня. Видно, что мощность, отводимая от конденсатора в первом и втором режимах выше, чем в третьем и четвертом, причина в том, что размер компрессора был больше, но тепло, поступающее в систему через солнечный тепловой коллектор на втором и четвертом режимах приводило к увеличению температуры и давления газообразного хладагента перед его поступлением в конденсатор, что способствовало выделению большего количества тепла.

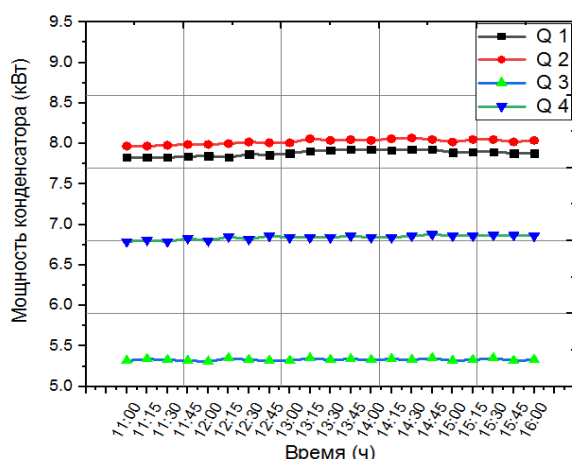


Рис. 7. Мощность конденсатора во время работы

Fig. 7. Condenser power during operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 8 Холодопроизводительность испарителя видно, что холодопроизводительность системы с солнечным тепловым коллектором в первом и втором режимах выше, чем в третьем и четвертом режимах. Причина в больших размерах компрессора, но тепло, добавляемое солнечным коллектором во втором и

четвертом режиме, усиливает процесс конденсации в конденсаторе, что повышает производительность испарителя.

На рисунке 9 показано изменение холодильных коэффициентов для четырех режимов с течением времени. Из графика видно, что холодильный коэффициент в четвертом режиме выше, чем в первом, втором и третьем режимах за счет тепла, добавляемого через солнечный тепловой коллектор, что привело к увеличению холодопроизводительности системы, что в свою очередь увеличило холодильный коэффициент.

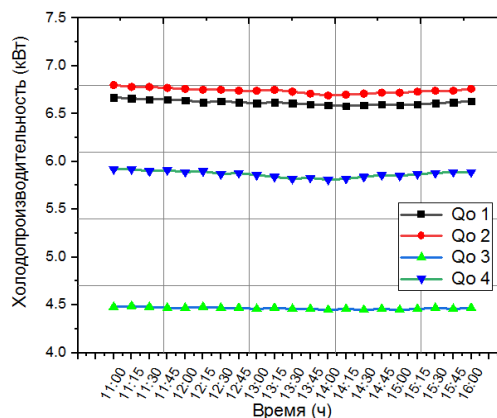


Рис. 8. Холодопроизводительность испарителя с течением времени

Fig. 8. Evaporator cooling capacity over time

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

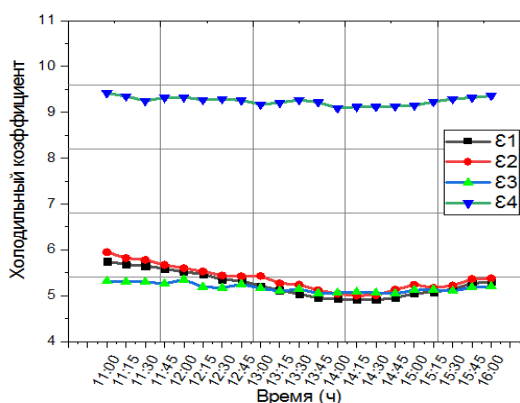


Рис. 9. Холодильный коэффициент в период эксплуатации

Fig. 9. Refrigeration coefficient during operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунках 10 и 11 видно, что коэффициент энергоэффективности и сезонный коэффициент энергоэффективности системы во втором и четвертом режиме выше, чем в первом и третьем. Причина – улучшение холодопроизводительности во втором и четвертом режиме в результате применения солнечного теплового коллектора.

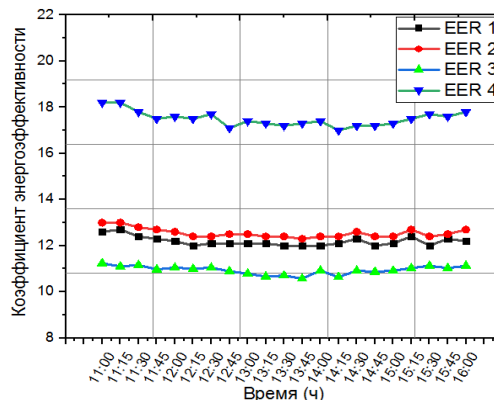


Рис. 10. Коэффициент энергоэффективности за период эксплуатации

Fig. 10. Energy efficiency coefficient for the period of operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

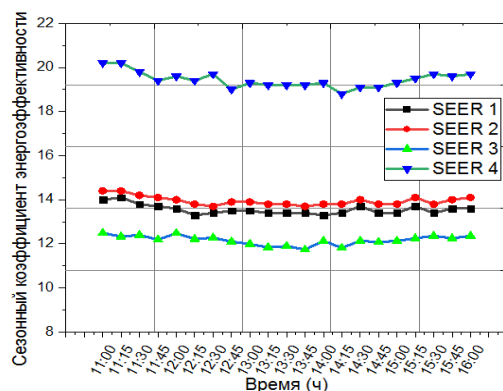


Рис. 11. Сезонный коэффициент энергоэффективности за период эксплуатации

Fig. 11. Seasonal energy efficiency coefficient for the period of operation

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 12 представлено количество тепловой энергии добавляемой в систему. Количество тепловой энергии, поглощаемой системой охлаждения от теплообменника солнечного теплового коллектора в четвертом режиме больше, чем во втором. Это объясняется тем, что уменьшение мощности компрессора привело к уменьшению объемного расхода, давления и температуры хладагента, что позволило поглощать большее количество тепловой энергии.

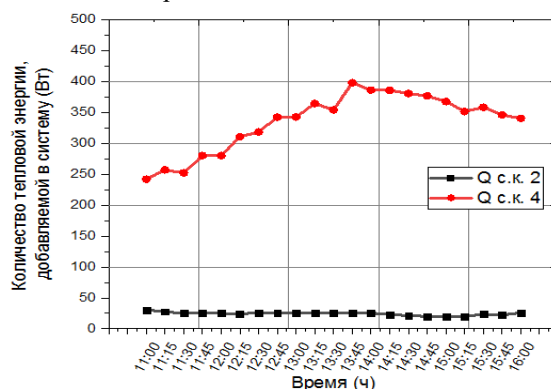


Рис. 12. Количество тепловой энергии, добавляемой в систему

Fig. 12. The amount of thermal energy added to the system

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Оценка энергосбережения солнечной системы охлаждения в ночное время.

Солнечная тепловая гибридная система кондиционирования воздуха нуждается в добавлении источника тепловой энергии в холодильный цикл в части, следующей за компрессором, что, в свою очередь, помогает снизить потребление электроэнергии и улучшить производительность системы охлаждения во время ее работы. Как показано, источником тепловой энергии, интегрированным с системой кондиционирования, является солнечный тепловой коллектор с вакуумными трубками, которые поглощают тепло солнечного света и преобразуют его в тепловую энергию горячей воды, находящейся в тепловом аккумуляторе.

Когда летом в шесть утра восходит Солнце, тепловой коллектор начинает собирать солнечную тепловую энергию и хранить ее в резервуаре с водой, а система охлаждения снабжается тепловой энергией до шести часов вечера. После захода Солнца тепловой коллектор начинает постепенно терять запасенную тепловую энергию. Для сохранения эффективности работы гибридной системы в ночное время определен размер теплового аккумулятора и необходимое количество воды. Количество запасенного тепла в аккумуляторе оценивалась по количеству тепловой энергии, поступающей в гибридную систему кондиционирования воздуха, с течением времени.

На рисунке 13 представлена интенсивность солнечной радиации, падающей на солнечный тепловой коллектор в период испытаний.

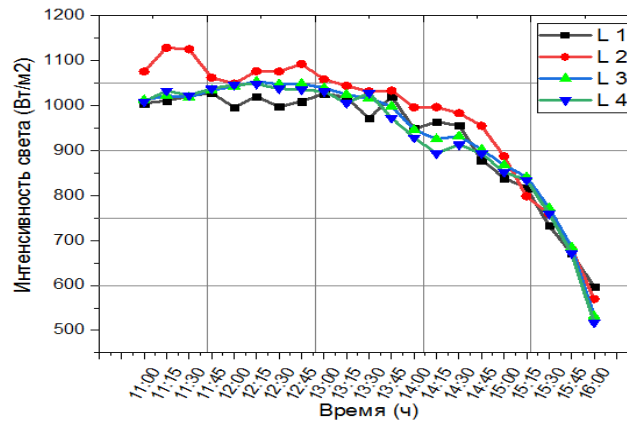


Рис. 13. количество солнечной радиации, падающей на солнечный тепловой коллектор за период испытаний

Fig. 13. amount of solar radiation falling on the solar thermal collector during the test period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

На рисунке 14 показана температура воды в термобаке в период испытаний для второго и четвертого режимов.

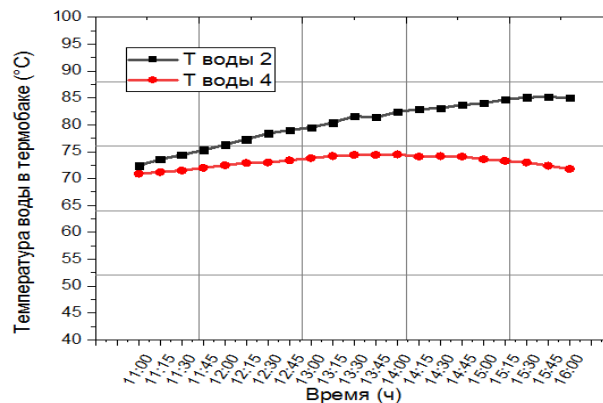


Рис. 14 Температура воды в термобаке в период испытаний

Fig. 14 Water temperature in the thermal tank during the test period

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author

Тепловая энергия, подаваемая в гибридную систему кондиционирования воздуха, рассчитывалась по уравнению (3).

Чтобы определить необходимый объем воды в резервуаре и количество тепловой энергии, добавляемую в систему от солнечного коллектора воспользуемся уравнениями (9) и (10).

$$Q_{с.к.} = m_r \cdot (h_3 - h_2) = m_w \cdot c_{p_w} \cdot (t_2 - t_1) \quad (9)$$

$$m_w = \frac{V_w \cdot \rho}{T} \quad (10)$$

где: $Q_{с.к.}$ – тепловая энергия солнца добавляемая в систему (кВт), m_w – массовый расход воды (кг/с), c_{p_w} – удельная теплоемкость воды 4,179 (кДж/кг·°C), V_w – объем воды в баке (м³), ρ – плотность воды 1000 (кг/м³), t_1 – минимальная температура, которую должна иметь вода в тепловом аккумуляторе рассчитывается как сумма температуры хладагента на выходе из компрессора плюс пять градусов, для обеспечения процесса добавления тепловой энергии в систему (°C), t_2 – максимальная температура, достигаемая водой (°C), T – время.

По уравнению (11) была рассчитана максимальная теплоемкость, которую необходимо подвести в систему в течение периода эксплуатации при отсутствии солнца в ночное время, а также максимально необходимый объем теплоаккумулирования и объем воды в баке.

$$V_w = Q_{с.к.} \cdot \frac{12 \cdot 3600}{\rho \cdot c_{p_w} \cdot (t_2 - t_1)} \quad (11)$$

где - 12 в числителе формулы (11) часы работы системы в отсутствии солнечного излучения, остальные обозначения те же.

В таблице 2 представлены результаты расчета тепловой нагрузки, необходимой для подачи от термобака и теплоаккумулирующей емкости во второй половине суток (ночи).

Таблица 2

Table 2

Результаты расчета тепловой нагрузки, необходимой для подачи от термобака, и объем теплоаккумулирующей емкости

Calculation results of the heat load required for supply from the thermal tank and heat capacity

Тип режима работы	Рабочие часы	$Q_{c,k}$ кВт	t_2 °C	t_1 °C	V_w Литр
Второй режим	13:30	0,0254	81.6	58.8	11.5
	13:45	0,0253	81.4	61.2	13.0
	14:00	0,0254	82.4	61.1	12.3
Четвертый режим	13:30	0,3539	74.4	59.4	244
	13:45	0,3976	74.4	59.6	278
	14:00	0,3860	74.5	60.1	277

**Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author*

Количество воды, необходимое в баке для сохранения тепловой энергии от солнечного коллектора и подачи ее в систему во второй половине суток, имеет обратно-пропорциональную зависимость от температуры воды в баке. По мере повышения температуры в баке количество воды, необходимое для нагрева, уменьшается, и наоборот. Соответственно, для определения максимального объема воды, необходимого для хранения в резервуаре, принимается наименьшая температура, достигаемая водой в резервуаре при максимальной потребляемой мощности.

Например для температуры воды t_2 65, 81, 95 °C:

$$V_w = (0,386 * 12 * 3600) / (1000 * 4,179 * (65 - 60,1)) = 815 \text{ л,}$$

$$V_w = (0,386 * 12 * 3600) / (1000 * 4,179 * (81 - 60,1)) = 190 \text{ л,}$$

$$V_w = (0,386 * 12 * 3600) / (1000 * 4,179 * (95 - 60,1)) = 114 \text{ л.}$$

Эти расчеты показывают, что солнечный тепловой коллектор способен обеспечить теплом гибридную систему кондиционирования при максимальной потребности в тепловой энергии в отсутствии излучения (после заката солнца), если температура воды достигнет 81 °C и выше.

Закключение (Conclusions)

Проведены эксперименты на стенде с гибридной системой кондиционирования воздуха в климате города Багдада. Выполнено сравнение ее параметров с парокомпрессионной системой кондиционирования воздуха.

Синтез солнечного теплового коллектора с парокомпрессионной системой кондиционирования воздуха снизил потребление электрической энергии компрессором и повысило производительность системы.

Определены термодинамические параметры рабочих тел системы в характерных точках цикла для четырех режимов работы системы:

1. традиционного компрессионного холодильного цикла с компрессором мощностью 7,034 кВт;
2. гибридного компрессионного холодильного цикла с компрессором мощностью 7,034 кВт;
3. традиционного компрессионного холодильного цикла с уменьшенной мощностью компрессора до 4,44 кВт;
4. гибридного компрессионного холодильного цикла, с уменьшенной мощностью компрессора до 4,44 кВт.

Результаты анализа показали, что потребление электрической энергии гибридной системы кондиционирования снизилось на 64%, а холодильный коэффициент ϵ составил 9,09 вместо исходного 4,93.

Литература

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.

2. Y. V. Vankov, A. K. Al-Okbi, and M. H. Hasanen, "Solar hybrid air conditioning system to use in Iraq to save energy," In E3S Web of Conferences, vol. 124, p. 01024, EDP Sciences, 2019.
3. Kumar MA, Patel D. Performance assessment and thermodynamic analysis of a hybrid solar air conditioning system. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;46:5632-8.
4. Kurniawan Y, Berkah FT, SU MT. Development of hot water storage in hybrid-solar thermal air conditioning system. InJournal of Physics: Conference Series 2020 Apr 1 (Vol. 1511, No. 1, p. 012123). IOP Publishing.
5. <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html> (дата обращения ноябрь 2023).
6. <https://www.statista.com/statistics/1302597/iraq-emissions-intensity-from-electricity-generation/> (дата обращения ноябрь 2023).
7. Munaaim, M. Arkam C., Karam M. Al-Obaidi, and M. Azizul Abd Rahim. "Performance Comparison of Solar Assisted and Inverter Air-Conditioning Systems in Malaysia." Journal of Design and Built Environment (2017): 53-61.
8. Al-Okbi A, Vankov Y, Kadhim H. Improving performance of direct expansion air conditioning systems while reducing electricity consumption through using hybrid energy. InE3S Web of Conferences 2021 (Vol. 289, p. 01014). EDP Sciences.
9. Abdelgaied M, Kabeel AE, Zakaria Y. Performance improvement of desiccant air conditioner coupled with humidification-dehumidification desalination unit using solar reheating of regeneration air. Energy Conversion and Management. 2019 Oct 15;198:111808.
10. Al-Okbi A, Vankov Y, Hussain HM. A hybrid air conditioning system using solar energy to save electrical energy with improving performance. InE3S Web of Conferences 2021 (Vol. 288, p. 01066). EDP Sciences.
11. Huang L, Zheng R, Piontek U. Installation and operation of a solar cooling and heating system incorporated with air-source heat pumps. Energies. 2019 Mar 14;12(6):996.
12. Xu, S. M., X. D. Huang, and R. Du. "An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology." Solar energy 85, no. 9 (2011): 1794-1804.
13. Bilgili, Mehmet. "Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system." Solar Energy 85, no. 11 (2011): 2720-2731.
14. Nwasuka, Nnamdi Cyprian, Nduka Nwankwojike, and Uchechukwu Nwaiwu. "Performance Evaluation of a Solar Hybrid Air-Conditioner." (2021).
15. Preisler, Anita, and Markus Brychta. "High potential of full year operation with solar driven desiccant evaporative cooling systems." Energy Procedia 30 (2012): 668-675.
16. Bouraba, Abdenour, Mohamed Saighi, Hind Saidani-Scott, and Abderrahmane Hamidat. "Cooling mechanism of a solar assisted air conditioner: An investigation based on pressure–enthalpy chart." international journal of refrigeration 80 (2017): 274-291.
17. Assadi, M. Khalaji, S. I. Gilani, and TC Jun Yen. "DESIGN a solar hybrid air conditioning compressor system." In MATEC Web of Conferences, vol. 38, p. 02001. EDP Sciences, 2016.
18. <https://hitachi-compressors.com/highly-h-series-ASH184TV-rotary-compressors.php> (дата обращения ноябрь 2023).

Авторы публикации

Аль-Окби Ахмед Кхалиль – Аспирант, Казанского государственного энергетического университета. Ассистент преподавателя в University of Technology, Iraq, Baghdad.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанского государственного энергетического университета.

References

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.
2. Y. V. Vankov, A. K. Al-Okbi, and M. H. Hasanen, "Solar hybrid air conditioning system to use in Iraq to save energy," In E3S Web of Conferences, vol. 124, p. 01024, EDP Sciences, 2019.
3. Kumar MA, Patel D. Performance assessment and thermodynamic analysis of a hybrid solar air conditioning system. Materials Today: Proceedings. 2021 Jan 1;46:5632-8.
4. Kurniawan Y, Berkah FT, SU MT. Development of hot water storage in hybrid-solar thermal air conditioning system. InJournal of Physics: Conference Series 2020 Apr 1 (Vol. 1511, No. 1, p. 012123). IOP Publishing.

5. <https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html>
6. <https://www.statista.com/statistics/1302597/iraq-emissions-intensity-from-electricity-generation/>
7. Munaaim, M. Arkam C., Karam M. Al-Obaidi, and M. Azizul Abd Rahim. "Performance Comparison of Solar Assisted and Inverter Air-Conditioning Systems in Malaysia." *Journal of Design and Built Environment* (2017): 53-61.
8. Al-Okbi A, Vankov Y, Kadhim H. Improving performance of direct expansion air conditioning systems while reducing electricity consumption through using hybrid energy. *InE3S Web of Conferences* 2021 (Vol. 289, p. 01014). EDP Sciences.
9. Abdelgaied M, Kabeel AE, Zakaria Y. Performance improvement of desiccant air conditioner coupled with humidification-dehumidification desalination unit using solar reheating of regeneration air. *Energy Conversion and Management*. 2019 Oct 15;198:111808.
10. Al-Okbi A, Vankov Y, Hussain HM. A hybrid air conditioning system using solar energy to save electrical energy with improving performance. *InE3S Web of Conferences* 2021 (Vol. 288, p. 01066). EDP Sciences.
11. Huang L, Zheng R, Piontek U. Installation and operation of a solar cooling and heating system incorporated with air-source heat pumps. *Energies*. 2019 Mar 14;12(6):996.
12. Xu, S. M., X. D. Huang, and R. Du. "An investigation of the solar powered absorption refrigeration system with advanced energy storage technology." *Solar energy* 85, no. 9 (2011): 1794-1804.
13. Bilgili, Mehmet. "Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system." *Solar Energy* 85, no. 11 (2011): 2720-2731.
14. Nwasuka, Nnamdi Cyprian, Nduka Nwankwojike, and Uchechukwu Nwaiwu. "Performance Evaluation of a Solar Hybrid Air-Conditioner." (2021).
15. Preisler, Anita, and Markus Brychta. "High potential of full year operation with solar driven desiccant evaporative cooling systems." *Energy Procedia* 30 (2012): 668-675.
16. Bouraba, Abdenour, Mohamed Saighi, Hind Saidani-Scott, and Abderrahmane Hamidat. "Cooling mechanism of a solar assisted air conditioner: An investigation based on pressure–enthalpy chart." *international journal of refrigeration* 80 (2017): 274-291.
17. Assadi, M. Khalaji, S. I. Gilani, and TC Jun Yen. "DESIGN a solar hybrid air conditioning compressor system." In *MATEC Web of Conferences*, vol. 38, p. 02001. EDP Sciences, 2016.
18. <https://hitachi-compressors.com/highly-h-series-ASH184TV-rotary-compressors.php>

Authors of the publication

Ahmed K. Al-Okbi - University of Technology, Iraq, Baghdad, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yury V. Vankov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.5. «Энергетические системы и комплексы»

Получено 26.10.2023 г.

Отредактировано 21.11.2023 г.

Принято 22.11.2023 г.