

УДК 621.577.22+004.942
doi:10.18720/SPBPU/2/id23-467

*Шаталов Константин Сергеевич*¹,
аспирант;

*Шаталова Ольга Михайловна*²,
профессор кафедры «Программное обеспечение», д-р экон. наук

**СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНУЮ
ЭНЕРГИЮ ГРУНТА**

^{1,2} Россия, Удмуртская Республика, Ижевск,
ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова»,
¹ konstshatalov@mail.ru, ² oshatalova@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена проблемам альтернативной энергетики, как важного условия экономического роста. В статье приведены некоторые данные, свидетельствующие об актуальности задач развития автономных систем теплоснабжения, использующих низкопотенциальную тепловую энергию грунта. Цель проводимого исследования состояла в разработке комплексной модели экономической эффективности теплонасосных систем. Статья представляет результат разработки структурного содержания такой модели; полученный результат позволяет эксплицировать значимые факторы экономической эффективности инвестиций в ТНС и может рассматриваться в качестве основания для математической формализации функциональных отношений между ними.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, энергоэффективность, тепловые насосы, эффективность, системный подход, моделирование.

*Konstantin S. Shatalov*¹,
Postgraduate;

*Olga M. Shatalova*²,
Professor Depart. of Computer Software, Ph.D (Economics)

**STRUCTURAL MODEL OF ECONOMIC EFFICIENCY OF HEAT
SUPPLY SYSTEMS USING LOW POTENTIAL ENERGY
OF GROUND**

^{1,2} Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Izhevsk, Udmurt Republic, Russia,
¹ konstshatalov@mail.ru, ² oshatalova@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the problems of alternative energy as an important condition for economic growth. The article presents some data that testify to the relevance of the tasks of developing autonomous heat supply systems using low-

potential thermal energy of the ground. The purpose of the study is to develop a comprehensive model for the economic efficiency of heat pump systems (HPS). The article presents the result of developing the structural content of such a model. The result obtained allows us to explicate the significant factors of economic efficiency of investments in HPS; this serves as the basis for the mathematical formalization of the functional relations between them.

Keywords: alternative energy, energy efficiency, heat pumps, efficiency, system approach, modeling.

Введение

Энергообеспечение становится в настоящее время ведущим фактором социально-экономического развития большинства государств. Проблема энергообеспечения экономики рассматривается, как правило, в двух аспектах: с одной стороны, дефицит энергетических ресурсов может выступать сдерживающим фактором экономического развития, с другой стороны, экономический рост зачастую приводит к повышению экологической нагрузки. Для объективных измерений этой проблемы сложился набор соответствующих макроэкономических показателей энергоэффективности, таких как энергоемкость ВВП и уровень карбоновых выбросов (рис. 1).

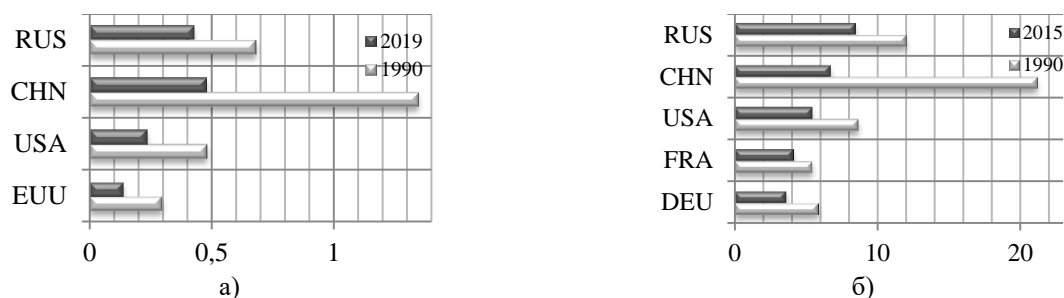


Рис. 1. Отдельные характеристики энергоэффективности в РФ (сравнительная оценка): а) выбросы CO₂ на единицу ВВП, кг.¹; б) уровень энергоемкости ВВП, МДж / ед.ВВП²). Источник: составлено авторами по данным Всемирного Банка [17]

Из представленных на рисунке 1 данных следует, что экономика РФ характеризуется высокой энергоемкостью ВВП и высоким «вкладом» в мировые карбоновые выбросы. Согласно сложившимся научным представлениям, энергоэффективность экономики становится следствием совокупности факторов: стоимость и доступность углеводородных ресурсов («традиционного» источника энергии), отраслевая структура экономики, уровень энергоемкости производств и домашних хозяйств. Эмпирически доказано, что «в богатых природными ресурсами странах снижение энергоемкости ВВП происходит медленнее» [9]; тогда как высокая стоимость

¹ Измерение ВВП произведено по паритету покупательной способности 2017 года; к выбросам относятся углекислый газ, образующийся при потреблении твердого, жидкого и газообразного топлива и сжигании попутного газа.

² В оценку энергоемкости принято потребление первичных источников энергии; измерение ВВП – в долл. США по паритету покупательной способности 2011 г.

углеводородных ресурсов зачастую становится стимулом к развитию альтернативной энергетики. Кроме того, важную роль играет политика государств и международных институтов по стимулированию альтернативной («зеленой») энергетики. Сравнительно высокая энергоемкость российской экономики может быть объяснима следующими факторами [15]: уровень ВВП, географические размеры территории государства, отраслевая структура промышленности, климатические условия; кроме этого, специалистами выделяется группа «прочих факторов», не поддающихся объяснениям через межстрановые сопоставления. По данным баланса энергоресурсов РФ [11], структура энергопотребления в стране характеризуется высокой долей затрат природного топлива на генерацию тепловой и электрической энергии, при этом существенную часть топливного обеспечения составляет природный газ (свыше 70 %). В этой связи необходимо отметить: «газ — ископаемое топливо с самыми низкими выбросами парниковых газов при использовании» [14]. Вместе с тем, для РФ характерно неполное покрытие территории страны сетями газоснабжения; по приведенным в «Энергетической стратегии РФ ...» данным «средний по стране уровень газификации составил <...> в сельской местности 59,4» [14]. Это зачастую становится препятствием к развитию отдельных сельских территорий, — социального развития и развития производств в сфере АПК.

В условиях некоторой недостаточности инфраструктуры энергообеспечения, становится особенно значимой задача развития автономных систем теплоснабжения, основанных на использовании природных возобновляемых энергетических ресурсов: электромагнитное излучение Солнца; кинетическая энергия ветра; механическая энергия водных ресурсов; геотермальная тепловая энергия; низкопотенциальная тепловая энергия грунта, воды, воздуха; тепловая энергия органических промышленных отходов; и др. Принимая во внимание природно-климатические условия российских территорий северных широт, важное значение приобретают современные технологии преобразования низкопотенциальной тепловой энергии грунта и ее применения для теплоснабжения жилых и промышленных объектов.

Сложившийся к настоящему времени зарубежный опыт показал высокий уровень надежности таких технологий, их функциональной и экономической эффективности, а также опережающее развитие теплонасосных систем в энергообеспечении жилых и промышленных объектов. Так, по данным немецкой Федеральной ассоциации тепловых насосов (BWP) количество проданных в Германии тепловых насосов за период с 2001 по 2020 гг. возросло более чем в двенадцать раз — до 140 тыс. ед./год (2020 г.) и около 20 процентов вновь установленных для отопления тепловых насосов являются грунтовыми; число установленных тепловых насосов составило к 2020 г. 1,37 млн. ед., в том числе 1,07 млн. тепловых насосов отопления, из которых 34 % используют низкопотенциальную тепловую энергию грунта; при этом темп прироста продаж тепловых насосов прогнозируется на уровне 14 % ежегодно [16].

Вместе с тем, высокая капиталоемкость внедрения таких технологий становится сдерживающим фактором. Решению данной проблемы может служить формирование и применение действенных инструментов поддержки управленческих решений о целесообразности внедрения систем использования низкопотенциальной энергии грунта в конкретных природно-климатических и экономических условиях. Поскольку в качестве основного критерия принятия решений выступает, как правило, эффективность, то разработка развернутой научно-обоснованной модели эффективности таких систем представляется актуальной научной задачей, имеющей высокую практическую значимость.

1. Используемые методы

Исследование проведено на основании общенаучных положений теории эффективности технических систем [7, 8, 12 и др.] и методологии оценки экономической эффективности инвестиций [2], а также специализированных научно-практических положений об экономической эффективности теплонасосных систем [4, 6 и др.].

В исследовании задействованы универсальные методы анализа и синтеза. Метод анализа реализован в декомпозиции параметров эффективности, которая составлена в соответствии с научными представлениями о сущности самой категории «эффективности» и спецификой объекта исследования. Синтетическая часть исследования состояла в разработке структурной модели, эксплицирующей содержание процессов установки и эксплуатации теплонасосных систем в форме параметров эффективности.

2. Результаты и обсуждения

1) Теплонасосные системы: схематичное представление

Для трансформации температур низкопотенциальных источников тепловой энергии в более высокую температуру, приемлемую для отопления и или горячего водоснабжения, применяется специальное устройство — тепловой насос. Тепловой насос (ТН) осуществляет повышение температуры за счет фазового перехода специальной рабочей жидкости на стадиях испарения и конденсации. Применение ТН для теплоснабжения объектов осуществляется в составе т. н. теплонасосных систем (ТНС), которые включают помимо ТН подсистемы съема теплоты с низкопотенциальных источников и подсистему нагрева теплоносителя для теплоснабжения помещений. Поскольку в северных широтах тепловая энергия грунта может оказаться недостаточной, сложились модифицированные решения в организации ТНС — они предусматривают бивалетную схему теплоснабжения, которая включает и теплонасос, и теплогенератор; кроме того, ТНС может быть усилена источником «вторичной» низкопотенциальной теплоты, например, от органических отходов производства.

Структура такой модифицированной ТНС схематично показана на рисунке 2.

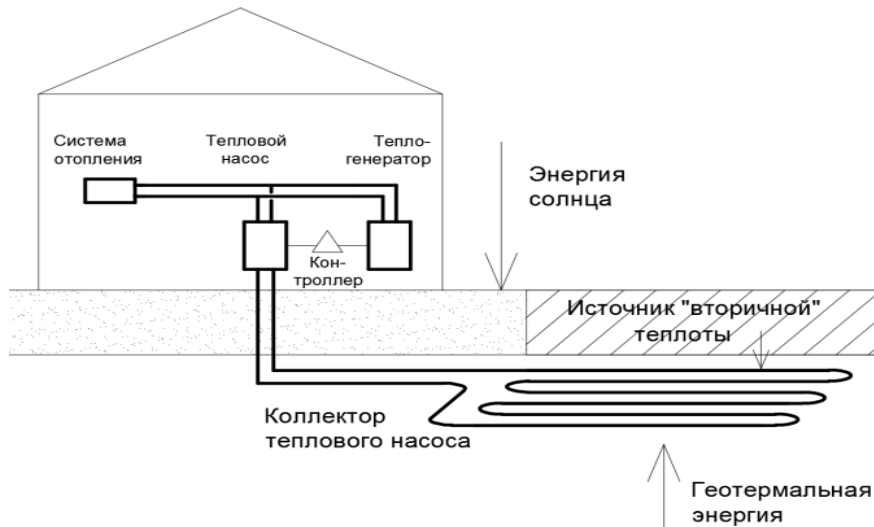


Рис. 2. Структурная схема бивалетной ТНС с использованием дополнительного источника низкопотенциальной тепловой энергии

Важным условием организации ТНС является соответствие нормам технического регулирования [10], предусматривающие, в том числе, необходимость: а) организации «двухцелевых установок, одновременно производящих искусственный холод и тепловую энергию для целей теплоснабжения»; б) резервирования ТН с учетом требований надежности к низкопотенциальному источнику теплоты; в) использования ТН «в полной заводской готовности согласно комплекту поставки» (п. 5.4 Правил).

2) *Специальные условия разработки модели экономической эффективности ТНС, использующих низкопотенциальную энергию грунта*

При разработке модели экономической эффективности ТНС были приняты за основу общие научно-практические подходы, которые могут быть описаны следующими основными положениями:

а) эффективность — это «комплексное операционное свойство (качество) процесса функционирования системы, характеризующее его приспособленность к достижению цели операции (выполнению задачи системы)» [12, с. 820];

б) эффективность представляет собой универсальный критерий принятия управленческих решений [7];

в) эффективность W представляет меру соответствия между требуемым и достигаемым / ожидаемым (при стратегии u) значениями показателя эффективности — $Y_{тр}$ и $Y(u)$, соответственно [8];

г) показатель эффективности Y (по определению) представляет собой вектор трех базовых параметров — целевой эффект q , стоимость ресурсов C , сроки T [8]:

$$Y = |q \ C \ T|^T; \quad (1)$$

д) количественная оценка эффективности W реализуется на основании специально вводимой числовой функции соответствия ρ [8]:

$$W = \rho(Y(u), Y_{TP}); \quad (2)$$

е) выбор формы Y и ρ осуществляется в зависимости от уровня и вида неопределенности в исследуемой системе [8, 13]:

– в отсутствие неопределенности (при детерминированных условиях) либо в условиях стохастической неопределенности применима скалярная форма Y ; при этом оценка эффективности может быть проведена на основании бинарной функции соответствия ρ , исходя из достижения необходимого соотношения между $Y(u)$ и Y_{TP} ;

– в условиях нестохастической неопределенности целесообразно применять векторную форму Y и специальные методы реализации функции соответствия, в том числе, методы многокритериальной оптимизации, нечеткого логического вывода, теоретико-игровые методы и др.;

ж) содержания параметров q , C , T зависит от характера реализуемых процессов и содержания исследуемой системы.

В дополнение к базовым положениям об оценке эффективности были приняты сложившиеся к настоящему времени специальные условия оценивания экономической эффективности инвестиций в ТНС. В составе таких условий нужно отметить предложенный С.Л. Елистратовым [4] методический подход к оценке эффективности по показателю «чистый дисконтированный доход», определяемому на основе аннуитетного дисконтированного денежного потока:

$$ЧДД = B \frac{1 - (1 + \beta)^{-T}}{\beta} - K, \quad (3)$$

где B — ежегодные «чистые» сбережения от применения ТНС; β — норма дисконтирования; T — продолжительность прогнозного периода; K — объем инвестиций в ТНС.

Содержащиеся в работах [1, 5 и др.] результаты исследования условий функционирования ТНС, а также сложившиеся к настоящему времени нормы технического регулирования в этой сфере были положены в основу экспликации факторов экономической эффективности в соответствии с общими положениями о параметрах эффективности (описанных в (1), (2)) и основными элементами жизненного цикла ТНС.

При исследовании структурного содержания модели эффективности инвестиций в ТНС были также приняты следующие условия:

- ориентация на специфику «северных широт», что находит свое отражение в технических особенностях: а) организации ТНС по бивалентной схеме, включающей электрическую генерацию тепла; б) использование в ТНС дополнительного низкопотенциального источника теплоты, в таком качестве рассматривается возможность утилизации теплоты биологических отходов производства, осуществляемого в объекте теплоснабжения;

- реализация основных принципов системного подхода — целеполагание, целостность, конструктивность, иерархическая структуризация и др., что позволяет использовать разработанную модель в качестве действенного инструмента поддержки управленческих решений;

- построение модели основано на принципе «сравнительной эффективности», при этом в качестве целевого эффекта принимается экономия электрической энергии на генерацию тепла;

- вид оцениваемой эффективности — «эффективность участия в проекте» [2], при этом не рассматривается «общественная эффективность» (в проявлении региональной и отраслевой значимости);

- оценка производится на основе дисконтированного денежного потока аннуитетной формы (3), при этом принимается безрисковая ставка дисконтирования;

- формируемая модель имеет аддитивную форму и модульную структуру; такое правило, по нашему мнению, обеспечит сопоставимость экономической и функциональной эффективности ТНС, а также формирует предпосылки к действенной программной реализации модели;

- разрабатываемая модель экономической эффективности инвестиций в ТНС имеет «двойное назначение» — во-первых, оценка экономической эффективности при заданных параметрах ТНС, во-вторых, «отладка» параметров ТНС по критерию эффективности;

- при построении модели заложены актуальные и перспективные нормы государственной поддержки «зеленой энергетики».

3) Структурное содержание модели экономической эффективности инвестиций в ТНС

Решение вопроса о структурном содержании модели экономической эффективности инвестиций в ТНС было направлено на создание достаточной экспликации значимых факторов. При этом такие факторы были структурированы в разрезе базовых параметров эффективности и идентифицированы в соответствии с технологическим содержанием жизненного цикла ТНС. Сформированная экспликация факторов приведена в таблице 1. Составленная экспликация способствует систематизированному представлению данных числовой природы для оценки экономической эффективности инвестиций в ТНС.

**Структурное содержание модели экономической эффективности инвестиций
в ТНС**

Параметры W	Формы проявления параметров W по основным элементам жизненного цикла ТНС	Состав работ и / или факторов W
1	2	3
Единовременные затраты (С)	Кап.вложения в изыскания и проектирование	геологические изыскания
		оценка и моделирование температурного режима
		разработка тех.условий
		подбор оборудования ТНС
		разработка проекта ТНС
Единовременные затраты (С)	Кап.вложения в оборудование и материалы	тепловой насос
		коллектор теплового насоса
		средства автоматического управления
		оборудование источника «вторичной» теплоты
	Кап.вложения в монтаж и затраты на пуско-наладочные работы	монтаж коллектора теплового насоса
		монтаж теплового насоса
		монтаж камеры хранения и обслуживания источника «вторичной» теплоты (отходов производства)
		монтаж средств автоматического управления ТНС
Период жизненного цикла системы (Т)	Предэксплуатационный период	предпроектные изыскания
		проектирование
		строительно-монтажные работы
		подбор оборудования ТНС
		разработка проекта ТНС
	Период эксплуатации теплового насоса	продолжительность цикла межремонтного обслуживания ТН
		срок службы ТН
		продолжительность цикла межремонтного обслуживания средств автоматического управления ТНС
		срок службы объекта теплоснабжения
	Период эксплуатации камеры хранения источника «вторичной» теплоты	периодичность обслуживания
		периодичность текущего ремонта
периодичность капитального ремонта		
Целевой эффект (q)	Экономия затрат на теплоснабжение (отопление) помещений	оценка общего объема энергопотребления на теплоснабжение помещений
		оценка производительности ТНС (на теплоснабжение)
		стоимость «традиционной» энергии, применяемой в теплогенераторе
		коэффициент производительности ТНС

Продолжение таблицы 1

1	2	3
	Экономия затрат на кондиционирование воздуха в помещениях	оценка общего объема энергопотребления на кондиционирование помещений
		оценка производительности ТНС (на холодоснабжение)
		стоимость «традиционной» энергии, применяемой для кондиционирования
		коэффициент производительности ТНС
	Эксплуатационные затраты (текущие)	стоимость энергообеспечения работы ТН
		затраты на текущий и капитальный ремонт ТН
		затраты на текущий и капитальный ремонт коллектора
		затраты на текущий и капитальный ремонт камеры хранения источника «вторичного» тепла
		затраты на текущий и капитальный ремонт средств автоматического управления ТНС
	Сопутствующие капитальные затраты (периодические)	стоимость замены ТН (приведенная)
		стоимость замены оборудования автоматического управления ТНС (приведенная)
	Стоимость специального «экологического товара»	(перспективный эффект)
	Стоимость владения земельным участком над зоной размещения грунтового коллектора ТН	площадь земельного участка
удельная стоимость владения		

Заключение

Российская экономика характеризуется низкой энергоэффективностью, что особенно проявляется в сопоставлении с развитыми государствами. Как отмечалось в [3], «низкая энергетическая эффективность порождает низкую конкурентоспособность российской промышленности» и «энергосбережение и повышение энергетической эффективности следует рассматривать как один из основных источников будущего экономического роста».

Задачи энергообеспечения имеют высокую значимость и в силу природно-климатических условий, характеризующихся высокой продолжительностью отопительного сезона, достигающего от 200 до 250 дн./год и низкой температурой атмосферного воздуха. При этом недостаточный уровень покрытия территории страны сетью централизованного газоснабжения становится препятствием к социально-экономическому развитию, особенно в сфере АПК.

В таких условиях становятся особенно значимыми современные технологии автономного теплоснабжения с использованием возобновляемых природных ресурсов, в том числе низкопотенциальной тепловой энергии грунта. Практическая реализация таких технологий имеет, как

правило, высокую капиталоемкость, и это зачастую становится сдерживающим фактором развития данного направления альтернативной энергетики. Преодолению данной проблемы могут способствовать действенные инструменты поддержки управленческих решений о целесообразности внедрения ТНС в конкретных природно-климатических и экономических условиях. Принимая во внимание общенаучное положение о том, что основным критерием принятия решений является эффективность, следует предположить, что разработка развернутой научно-обоснованной модели экономической эффективности является актуальной научной задачей, имеющей высокую практическую значимость. Разработка структурного содержания модели экономической эффективности инвестиций в ТНС позволило эксплицировать основные значимые факторы. Приведенные в статье результаты исследования служат основой для его продолжения, направленного на разработку: а) математической формализации функциональных отношений между параметрами эффективности; б) программной реализации модели экономической эффективности инвестиций в ТНС.

Список литературы

1. Васильев Г.П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли : диссертация ... д-ра техн. наук: 05.23.03. – М., 2006.
2. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика. – М.: Дело, 2004. – 888 с.
3. Государственная программа РФ «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» (утв. распоряжением Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. N 2446-р).
4. Елистратов С.Л. Оценка границ технико-экономической эффективности применения тепловых насосов // Вестник ЮУрГУ. – 2009. – №15. – С.72–78.
5. Елистратов С.Л. Комплексное исследование эффективности тепловых насосов : дисс. ... д-ра техн. наук : 01.04.14. – Новосибирск, 2010. – 383 с.
6. Закиров Д.Г., Рыбин А.А. Использование низкопотенциальной теплоты. — М.: Изд-во «Русайнс», 2015. Кн. 1. 158 с., Кн. 2. – 154 с.
7. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1986. Т. 1. Методология. Организация. Терминология / под ред. А. И. Рембезы. – 224 с.
8. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. / ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 1988. – (В пер.). Т. 3. Эффективность технических систем / под общ. ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. – 328 с.
9. Подкорытова О. А., Раскина Ю. В. Постсоветское пространство и Европейский союз: преодоление разрыва в энергоэффективности // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2014. – Сер. 5. Вып. 2. – С. 106–121.
10. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок (утв. Приказом Минэнерго России от 24.03.03 № 115).

11. Росстат. Официальная статистика. Предпринимательство. Промышленное производство. Баланс энергоресурсов РФ [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения 11.11.2022).
12. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учеб. пособие / Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 848 с. – С. 820.
13. Шаталова О.М. Эффективность инновационных процессов: методология нечетко-множественного моделирования и оценки : дисс. ... д-ра экон. наук : 08.00.13. – М., 2020. – URL: https://www.frccsc.ru/diss-council/00207306/diss/list/shatalova_om (дата обращения 11.11.2022).
14. Энергетическая стратегия РФ на период до 2035 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 года N 1523-р).
15. Энергоэффективность в России: скрытый резерв: Отчет // WB, IFC. – URL: http://www.cenef.ru/file/FINAL_EE_report_rus.pdf. – С. 39 (дата обращения 11.11.2022).
16. Branchenstudie 2021: Marktanalyse – Szenarien – Handlungsempfehlungen. – URL: https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/BWP_Branchenstudie_2021_WEB.pdf (дата обращения 11.11.2022).
17. DataBank. Sustainable Development Goals. – URL: [https://databank.worldbank.org/source/sustainable-development-goals-\(sdgs\)#](https://databank.worldbank.org/source/sustainable-development-goals-(sdgs)#); DataBank. Sustainable Energy for All. – URL : <https://databank.worldbank.org/source/sustainable-energy-for-all#> (дата обращения 11.11.2022).