

Стратегическое планирование развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса

Рецензия эксперта на статью получена 31.08.2022 [The expert review of the article was received on August 31, 2022]

Введение

Топливо-энергетический баланс (ТЭБ) отражает соотношение объёмов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), поступающих от производства или импорта и уменьшающихся за счёт потребления или экспорта, для некоторой территории или экономического объекта.

Построение топливно-энергетического баланса источника теплоснабжения и города в целом является актуальной задачей, которая включает в себя анализ влияния на топливно-энергетический баланс различных факторов, таких как изменения электрических и тепловых нагрузок, развитие возобновляемых и распределённых источников энергии, ущерб здоровью человека и окружающей среде от выбросов вредных веществ и т.д. Также без создания ТЭБ исчезает возможность правильного планирования развития топливно-энергетического комплекса.

Системным вопросам совершенствования топливно-энергетического комплекса (ТЭК) и создания топливно-энергетических балансов предприятий и систем энергоснабжения городов посвящено значительное количество работ учёных как советского, так и современного периодов российской истории [1, 2].

Работы советских учёных, такие как [1], заложили основы составления и анализа топливно-энергетических балансов. Но во время написания данных работ отсутствовали современные средства обработки данных, что накладывало некоторые ограничения. Работа по развитию предыдущих исследований с учётом современ-

Построение топливно-энергетического баланса источника теплоснабжения и города включает в себя анализ влияния на топливно-энергетический баланс самых различных факторов

ных возможностей является актуальной задачей. Статья [2] посвящена созданию ТЭБ для города Москвы на основе данных за 2018 год. В этом исследовании топливно-энергетический комплекс представлен графически, что является важным условием его интуитивного понимания, оценки структуры энергопотребления, а также энергоёмкости валового регионального продукта. Однако в данной статье не рассматривается ТЭБ с точки зрения его оптимизации, а также стоит отметить, что баланс строится вручную, без использования программного обеспечения.

Согласно официальной статистической методологии, для представления энергетических балансов используются следующие определения:

- однопродуктовый энергетический баланс представляет собой таблицу, отражающую формирование каждого конкретного вида энергетических ресурсов или их разнородных групп (например, нефтепродуктов) и их использование в процессах преобразования, транспортировки и конечного потребления;
- сводный топливно-энергетический баланс представляет собой таблицу, объединяющую все энергетические балансы отдельных продуктов в один.

УДК 620.92:658.26. Научная специальность: 2.4.6 (05.14.04).

Методология стратегического планирования развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса

Ю. В. Яворовский, к.т.н., заведующий кафедрой промышленных теплоэнергетических систем; И. А. Султангузин, д.т.н., профессор; А. И. Бартечев, аспирант; И. Д. Калякин, аспирант, [Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» \(НИУ «МЭИ»\)](#); А. П. Яшин, разработчик ПО, компания ООО «Всё для календарей»

Целью данной работы является разработка методологии стратегического планирования развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса (ТЭБ). Моделирование ТЭБ города осуществляется с использованием программы «ОптимТЭБ». Данное программное обеспечение позволяет отображать информацию в удобном для анализа графическом виде с возможностью оптимизации потребления топливно-энергетических ресурсов в различных секторах за счёт использования энергосберегающих технологий. Построение ТЭБ городов и регионов является первоочередной задачей стратегического планирования развития их топливно-энергетического комплекса со снижением вредных выбросов, включая парниковые газы. В статье представлены результаты построения математической модели и оптимизации ТЭБ на примере Москвы с учётом развития инфраструктуры электротранспорта. Определены основные направления повышения энергоэффективности на основе полученных результатов.

Ключевые слова: топливно-энергетический баланс, ТЭЦ, моделирование, оптимизация, централизованное теплоснабжение, парниковые газы, вредные выбросы, стратегическое планирование, электротранспорт.

UDC 620.92:658.26. The number of scientific specialty: 2.4.6 (05.14.04).

Methodology of strategic planning of city development based on modeling and optimization of fuel and energy balance

I. A. Sultanguzin, Doctor of Technical Sciences, Professor; Yu. V. Yavorovsky, PhD, Head of the Industrial Thermal Engineering Systems Department; A. I. Bartenev, postgraduate student; I. D. Kalyakin, postgraduate student, [National Research University "Moscow Power Engineering Institute" \(NRU "MPEI"\)](#); A. P. Yashin, software engineer, "Everything for calendars", LLC

The purpose of this work is to develop a methodology for strategic planning of city development based on modeling and optimization of the fuel and energy balance (FEB). Modeling of the city's FEB is carried out using the "OptiTEB" program. This software allows to display information in a convenient graphical form for analysis with the possibility of optimizing the consumption of fuel and energy resources in various sectors through the use of energy-saving technologies. The creation of FEB of cities and regions is a priority task of strategic planning for the development of their fuel and energy complex with the reduction of harmful emissions, including greenhouse gases. The article presents the results of mathematical modeling and optimization of the FEB on the example of Moscow with taking into account the development of electric transport infrastructure. The main directions of energy efficiency improvement based on the obtained results are determined.

Key words: fuel and energy balance, CHP, modeling, optimization, district heating, greenhouse gases, harmful emissions, strategic planning, electric transport.

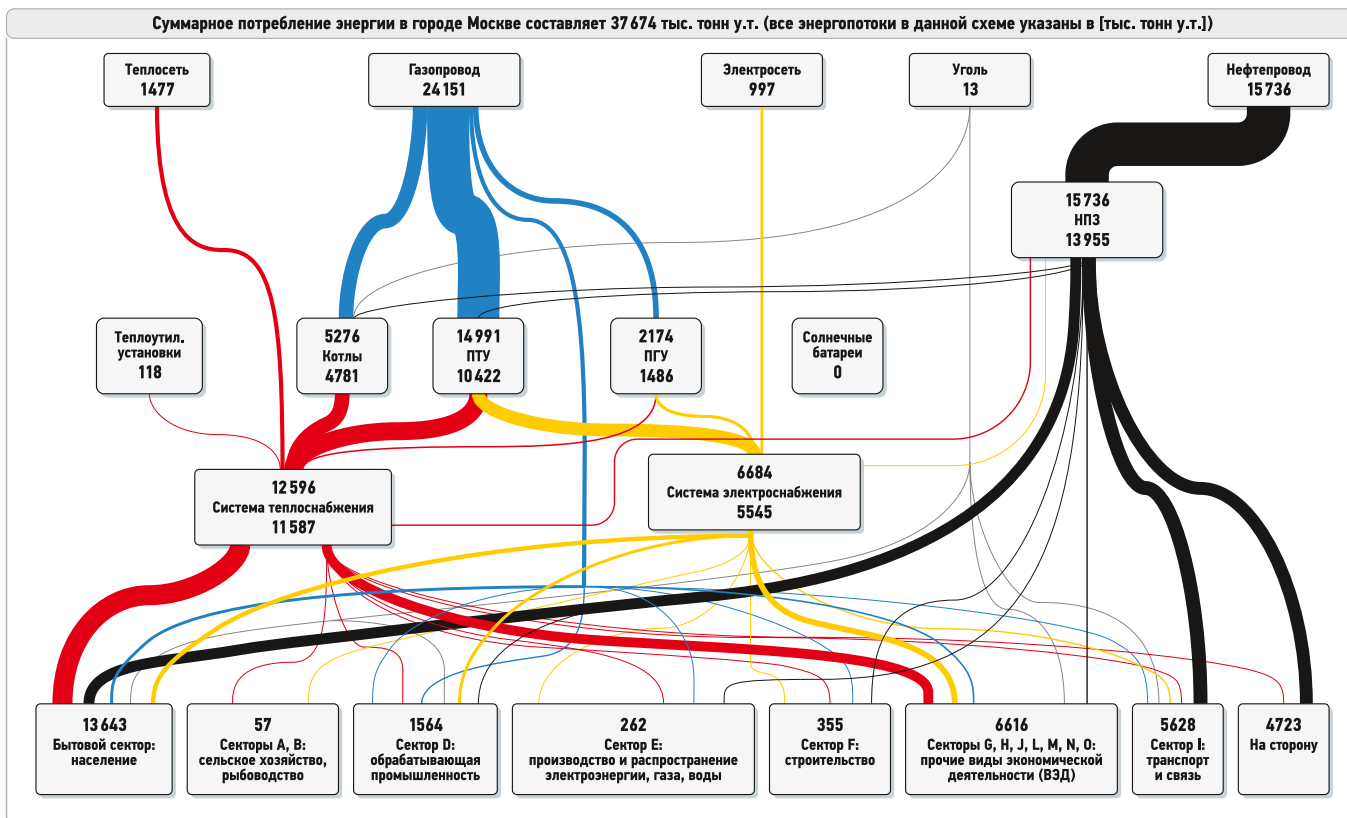


Рис. 2. Расчётный ТЭБ Москвы, построенный в программе «ОптиТЭБ»

Из анализа ТЭБ Москвы видно, что частные автомобили населения, общественный и грузовой транспорт потребляют около 9,4 млн тонн у.т. в год. В то же время в атмосферу выбрасывается 95 % всех вредных выбросов Москвы (CO, NO_x, мелкодисперсная пыль до 2,5 мкм) и огромное количество парниковых газов.

Необходимо исследовать систему городского транспорта и разработать соответствующий комплекс мер по сокращению выбросов парниковых газов в этом секторе. Промышленность, включая строительство, производство и распределение электроэнергии, транспортировку газа и воды, потребляет 2,5 млн тонн у.т. конечной энергии в год. Также необходимо проанализировать потребление энергии в этих секторах и определить потенциал сокращения выбросов парниковых газов.

Синтезируя вышеописанные элементы системы, которые описываются своими математическими зависимостями, можно проводить исследования на основе системного подхода. Важность системного исследования энергетических систем доказана и подтверждена практикой ещё в XX веке [1]. Принимая во внимание тенденцию развития децентрализации, основанной на применении ВИЭ, необходимо найти пути интегрирования этих систем в единую за счёт технологий накопления энергии, сбалансированного перераспределения генерирующих мощностей, сглаживания пиковых нагрузок. Добавляя

новые элементы и связывая их с имеющимися, можно принимать обоснованные решения по развитию городского топливно-энергетического комплекса.

Например, развитие электротранспорта приносит существенную неопределённость в прогнозные модели и не учитывается при разработке сценариев [5].

Рассматриваемый в данной статье программный комплекс «ОптиТЭБ» позволяет моделировать топливно-энергетические балансы городов, а также производить оптимизацию по энергетическим и экологическим критериям при варьировании задаваемых параметров

Методология стратегического планирования развития системы энергоснабжения города с применением «ОптиТЭБ» Программа «ОптиТЭБ»

ТЭБ крупных городов представляет из себя сложную многокомпонентную систему, включающую в себя различные сферы жизнедеятельности человека. Для получения достоверных данных об эффективности применения различных энергосберегающих мероприятий необходимо рассматривать всю систему в комплексе, так как различные элементы могут оказывать

влияние друг на друга. Поскольку для анализа ТЭБ города необходимо обработать большое количество данных, с целью исключения возможности ошибки было принято решение о создании программы по расчёту и оптимизации ТЭБ городов — «ОптиТЭБ» [6, 7].

Программное обеспечение «ОптиТЭБ» разработано в среде программирования Microsoft Visual Studio Community на языке программирования C# в соответствии с методологией объектно-ориентированного программирования и реализовано в виде веб-приложения ASP.NET на платформе .NET Core [7].

Данное программное обеспечение позволяет моделировать топливно-энергетические балансы городов, а также производить оптимизацию по энергетическим и экологическим критериям при варьировании задаваемых параметров [степень утепления здания, перераспределение тепловых нагрузок между котельными, парогазовыми установками (ПГУ) и паротурбинными установками (ПТУ), степень электрификации транспорта в различных секторах и т.п.]. Более подробное описание алгоритма работы программы «ОптиТЭБ» дано в статье [7].

В процессе выполнения данной работы были сформированы основные направления по развитию ТЭБ городов в перспективе до 2060 года (рис. 2).

Рассмотрим предлагаемые мероприятия подробнее.

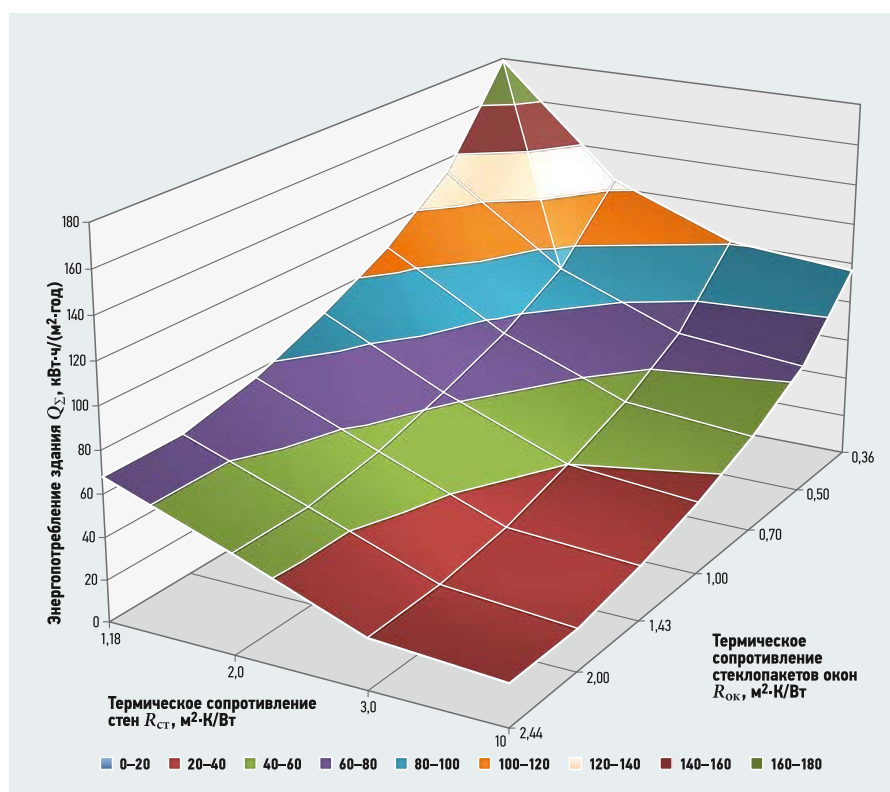


Рис. 3. Зависимость энергопотребления здания от термического сопротивления стен и окон

Ключевые энергосберегающие мероприятия для оптимизации ТЭБ

В основе работы по оптимизации ТЭБ города Москвы лежат следующие ключевые энергосберегающие мероприятия:

- повышение тепловой защиты зданий;
- перераспределение тепловых нагрузок между котельными, ПГУ и ПТУ;
- строительство ПГУ на основе современных силовых установок взамен ПТУ;
- модернизация ТЭЦ с использованием абсорбционных трансформаторов теплоты (АТТ);
- увеличение доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе города;
- увеличение доли электротранспорта;
- использование технологии Vehicle-to-grid (V2G) передачи электроэнергии от электромобиля в сеть.

Рассмотрим каждое из предложенных направлений оптимизации энергобалансов подробнее.

Повышение тепловой защиты зданий

Основными потребителями тепловой энергии в России являются промышленное производство (46%) и население (35%) [8]. Отставание в реализации законодательных актов в области энергоэффективности и деградация в нормировании показателей теплотехники и энергопотребления на отопление и вентиляцию зданий [9, 10] обуславливает значительный потенциал энергосбережения в сфере теплотребления бытового сектора.

В странах северной части Европы идёт повышение требований к энергоэффективности зданий и повышение теплотехнических характеристик производится по принципам концепции пассивного дома, за счёт чего появляется возможность

Результаты энергомоделирования здания научно-технической библиотеки МЭИ [12] показывают, что за счёт повышения термического сопротивления стен и окон можно снизить теплопотери в семь раз и уменьшить потребление энергии на отопление

строить всё больше как индивидуальных, так и общественных зданий [11] с нулевым или положительным годовым энергобалансом. Строительство и исследования зданий с низким энергопотреблением в России проводятся и показывают, что можно достигать нулевого годового энергобаланса, однако эта практика не имеет массового характера. Результаты энергомоделирования здания научно-технической библиотеки МЭИ [12] показывают, что за счёт повышения термического сопротивления стен и окон можно снизить теплопотери в семь раз и соответственно уменьшить потребление энергии на отопление (рис. 3).

Существенное снижение теплового потребления со 179 до 101 кВт·ч/(м²·год) может быть достигнуто за счёт применения современных теплоизоляционных материалов [минеральной ваты, экструдированного пенополистирола, вспененного полиизоцианурата (PIR) и др.] при увеличении коэффициента термического сопротивления стен с 1,18 до 7 м²·К/Вт.

При увеличении коэффициента термического сопротивления окон с 0,357 до 2 м²·К/Вт тепловое потребление здания уменьшается до 68 кВт·ч/(м²·год) за счёт применения тройного остекления, энергосберегающих и мультифункциональных напылений на стёклах, инертных газов в межкамерных пространствах, утеплённых профилей рам и т.д. При одновременном утеплении стен и окон может быть достигнут синергетический эффект уменьшения теплотребления здания до 25 кВт·ч/(м²·год). В масштабах города Москвы при снижении тепловой нагрузки зданий в два раза можно сократить потребление ТЭР на 3,077 млн тонн у.т. (8,1 % от общего) за счёт применения современных технологий в строительстве.



Московская ТЭЦ-21 (1765 МВт, 4918 Гкал/ч) введена в эксплуатацию в 1963 году

Перераспределение тепловых нагрузок между котельными, ПГУ и ПТУ

Перераспределение тепловых нагрузок между котельными, ПГУ и ПТУ позволяет оптимизировать генерацию энергии на источниках. В настоящее время в Москве наблюдается тенденция по переключению тепловых нагрузок с котельных ПАО «МОЭК» на ТЭЦ ПАО «Мосэнергосбыт» с получением значительных топливных эффектов и, как следствие, повышением энергетической эффективности всего топливно-энергетического комплекса.

Максимизация производства электроэнергии на тепловом потреблении и использования тепла топлива является залогом повышения эффективности работы ТЭК [13]. При этом в первую очередь необходимо переключать нагрузку на ПГУ, так как данные блоки зачастую являются более современными, чем ПТУ, а также имеют более высокий КПД. После максимально возможной загрузки ПГУ нагрузка переключается на ПТУ — в первую очередь на наиболее современные и эффективные турбины, такие как Т-250/300-240 и Т-295/335-23.

Строительство ПГУ на основе современных силовых установок взамен ПТУ

Замещение ПТУ современными ПГУ основано изменением характера спроса на энергетические ресурсы, а именно сокращением спроса на тепло вследствие вывода из эксплуатации многих теплоёмких производств и реализации энергосберегающих технологий. Вместе со снижением спроса на тепловую энергию увеличивается спрос на электроэнергию, в том числе за счёт распространения электротранспорта.

Данный пункт подразумевает переоснащение ТЭЦ с применением отечественных турбин средней и большой мощности — ГТЭ-65 и ГТЭ-170. Эти газовые турбины являются наиболее передовыми разработками в области отечественного турбостроения и имеют характеристики, сопоставимые с аналогичными турбинами, применяемыми за рубежом. Приоритетом для применения вышеуказанных газовых турбин является необходимость повышения энергетической безопасности страны за счёт импортозамещения в области энергоснабжения.

Модернизация ТЭЦ с использованием АТТ

Модернизация ТЭЦ с использованием абсорбционных трансформаторов теплоты (АТТ) [14] позволяет решить сразу несколько задач, а именно повысить энергетическую эффективность работы

Максимизация производства электроэнергии на тепловом потреблении и использования тепла топлива является залогом повышения эффективности работы ТЭК. При этом в первую очередь необходимо переключать нагрузку на ПГУ, так как данные блоки зачастую являются более современными, чем ПТУ, а также имеют более высокий КПД

паротурбинного цикла, а также снизить выбросы тепла (тепловое загрязнение) в атмосферу через градирни, которые достигают 45–50 %. На сегодняшний день данная технология модернизации широко применяется в Китае [15].

В основе подобной модернизации лежит установка абсорбционных трансформаторов теплоты на ТЭЦ и на ЦТП у потребителей. АТТ на ТЭЦ используется для передачи низкопотенциальной тепловой энергии контура охлаждения конденсатора в тепловую сеть.

АТТ на ЦТП позволяет изменить температурный график тепловых сетей. При этом для магистральных сетей температурный график составит 120/20 °С, а для разводящих тепловых сетей — 60/40 °С. Данная модернизация позволит сэкономить порядка 7 % от сжигаемого топлива на ТЭЦ.

Увеличение доли использования ВИЭ в энергобалансе города

Увеличение доли использования ВИЭ в энергобалансе города (применение солнечных панелей и навесов) позволит существенно увеличить генерацию электроэнергии без дополнительной загрузки оборудования существующих источников электрогенерации.

В настоящее время проводятся исследования, показывающие перспективность использования солнечных панелей в фасадах зданий с целью генерации электроэнергии [16]. Данное мероприятие становится особенно актуальным при повсеместном переходе на электротранспорт — как способ не только обеспечить дополнительный прирост мощности, но и снизить выбросы вредных веществ в атмосферу. При этом также необходимо обратить внимание, что во многих странах вводится запрет на постройку домов без наличия микрогенерации, основанной на ВИЭ [17]. Однако в России на данный момент такая практика отсутствует, и закон о микрогенерации не подразумевает строительство жилых многоквартирных домов с солнечными электростанциями.

Увеличение доли электротранспорта

Увеличение доли электротранспорта является общемировой тенденцией. В отчёте Международного энергетического агентства (IEA) по электромобилям за 2020 год [18] рассмотрены сценарии увеличения доли электротранспорта, а также даются рекомендации по оптимизации энергохозяйства с целью снижения нагрузки на электрические сети в пиковые часы с учётом современных технологий (например, Vehicle-to-grid). Россия также развивает данное направление. Однако увеличение доли электротранспорта должно быть взаимосвязано с увеличением доли ВИЭ. Совместное их развитие обусловлено особенностью выбросов загрязняющих веществ от электромобилей. При эксплуатации электромобилей без постройки ВИЭ в системе нет снижения выбросов, так как электроэнергия будет производиться на традиционных источниках — ТЭЦ, КЭС и т.п., и в общем балансе будет происходить только «перенос» выбросов «с улиц» на дымовые трубы источников электрогенерации.

В статье [19] говорится: «Сложившаяся инфраструктура генерации электроэнергии при большой доле электростанций, работающих на ископаемых (угле, нефти и газе), не дадут положительного экологического эффекта от перехода на электромобили». Что также подчёркивает необходимость развития ВИЭ совместно с переходом на электромобили для реального снижения выбросов от транспорта.

Передача электроэнергии от электромобиля в сеть

Использование технологии Vehicle-to-grid позволяет применять электромобили как элементы аккумуляции в энергосистеме городов. В основе V2G лежит возможность разряжать аккумуляторы электромобилей, подключённых к зарядным станциям, с выдачей их мощности в сеть. Преимущества данной технологии [20]:

- выравнивание пиковых нагрузок энергопотребления в течение суток;
- владельцы электротранспорта получают финансовую выгоду (зарядка по ночному тарифу, отпуск в сеть — по дневному);
- электромобили могут использоваться для хранения избыточной энергии от источников возобновляемой энергии;
- электромобили могут выступать в качестве резервного источника питания при перебоях с поставками электроэнергии;
- снижение капитальных затрат на строительство новых электростанций для покрытия пиковых нагрузок в периоды одновременной зарядки большого количества электромобилей.

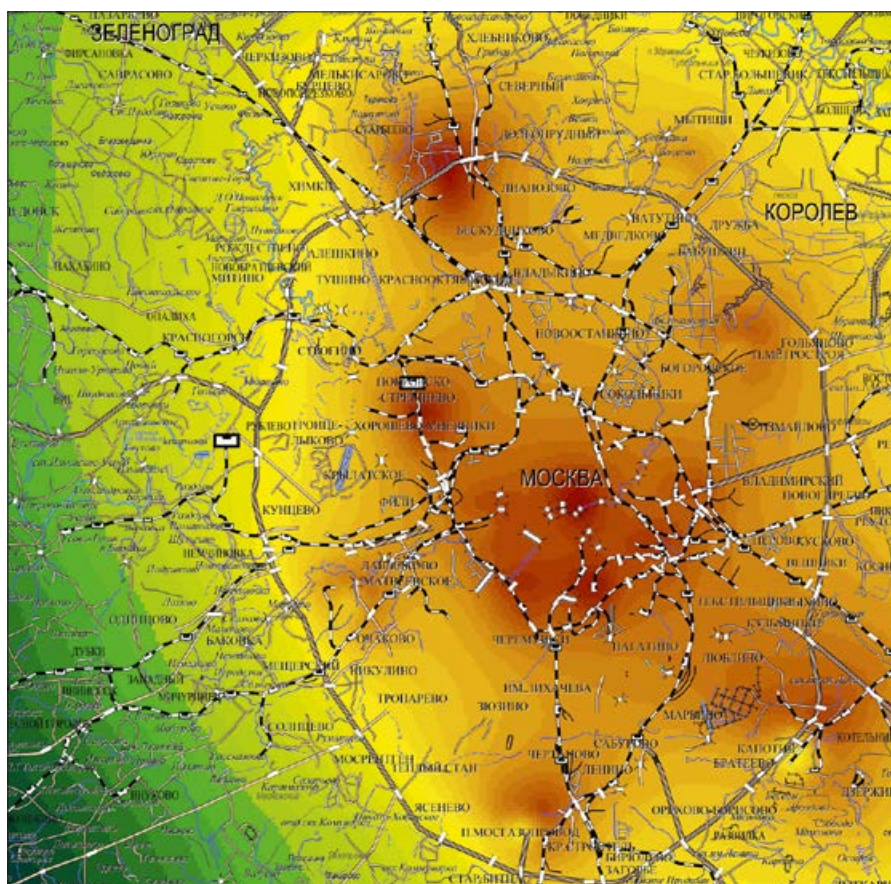


Рис. 4. Рассеивание оксидов азота от ТЭЦ ПАО «Мосэнерго»

Снижение потребления ТЭР в результате внедрения энергосберегающих мероприятий табл. 1

Мероприятие	Сокращение потребления ТЭР		Сокращение выбросов CO ₂ от сжигания топлива	
	%	тыс. тонн у.т.	%	тыс. тонн
Повышение тепловой защиты зданий	8,1	3077	7,9	4736
Перераспределение тепловых нагрузок между котельными, ПГУ и ПТУ	8,9	3371	8,7	5203
Строительство ПГУ на основе современных силовых установок взамен ПТУ	4,4	1655	4,1	2476
Модернизация ТЭЦ с использованием АТТ	1,6	517	1,4	821
Увеличение доли использования ВИЭ в энергобалансе города (солнечные панели)	4,2	1587	4	2367
Увеличение доли электротранспорта (замещаемое топливо — бензин)	1,1	398	3,4	2019

Оценка выбросов парниковых газов в Москве, тыс. тонн CO₂ в год табл. 2

Вид выбросов	Уголь	Моторные топлива	Природный газ	Всего
CO ₂ от сжигания топлива	75	20 223	42 202	62 500
Выбросы парниковых газов от углеводородов C _m H _n	—	522	400	992
Выбросы парниковых газов от хладагентов	—	—	—	2270
Итого выбросы	—	—	—	65 762

Выбросы вредных веществ от ТЭЦ и их воздействие* табл. 3

Загрязняющее вещество	Выбросы, тыс. т/год	Вид воздействия	Ущерб, чел. в год
SO ₂	6692	Смертность от SO ₂	40,0
Твёрдые вещества (пыль, мелкие частицы)	1229	Внезапная смертность от пыли	3,4
		Хроническая смертность от пыли	25,8
CO	960	Внезапная смертность от CO	0,2
NO _x	37 770	Внезапная смертность от NO _x	160,4
Итого	46 651	Суммарная смертность	229,8

* С учётом выбросов от ТЭЦ-22 и ТЭЦ-27.

Эффективность внедрения энергосберегающих мероприятий

Применение вышеописанных направлений развития энергосистемы при стратегическом планировании позволит оптимизировать ТЭБ и добиться снижения потребления ТЭР.

В табл. 1 приведены сводные данные по сокращению потребления ТЭР и сокращению выбросов CO₂ за счёт применения предложенных мероприятий. Как видно из табл. 1, наиболее эффективными с точки зрения снижения потребления топливно-энергетических ресурсов являются мероприятия по перераспределению тепловых нагрузок между котельными, ПГУ и ПТУ, а также по утеплению зданий — сокращение потребления ТЭР на 8,9 и 8,1 %, соответственно.

Совершенствование ТЭБ с внедрением вышеописанных мероприятий может позволить существенно сэкономить ТЭР, при этом такая модернизация топливно-энергетического комплекса также даст возможность снизить выбросы вредных веществ в атмосферу. Важно отметить, что эффект от реализации представлен для каждого мероприятия в отдельности.

Совместная реализация мероприятий в процессе оптимизации рассмотрена в пункте 5.

Оценка воздействия вредных выбросов на отрасли экономики города

Как видно из табл. 1, предложенные мероприятия оказывают существенное влияние не только на снижение потребления ТЭР, но и на сокращение вредных выбросов в атмосферу.

В данной работе при проведении оценки воздействия вредных выбросов учитываются выбросы парниковых газов, а также CO, NO_x, SO₂, пыли и других вредных веществ. В табл. 2 представлена оценка выбросов парниковых газов, основанная на анализе ТЭБ Москвы. При сжигании различных видов топлива образуется углекислый газ в количестве 62,5 млн тонн в год, которые примерно соответствуют отчётным данным за 2015 год (63,1 млн тонн в год) [21].

Основными источниками вредных выбросов в энергетическом секторе являются ТЭЦ и котельные. Для оценки воздействия вредных выбросов на население Москвы был проведён расчёт рассеивания вредных выбросов ТЭЦ с использованием методологии Impact Pathway и программного обеспечения ISC Manager [22]. Исходные данные [23] и результаты расчёта приведены в табл. 3, на рис. 4 показано рассеивание выбросов оксида азота.

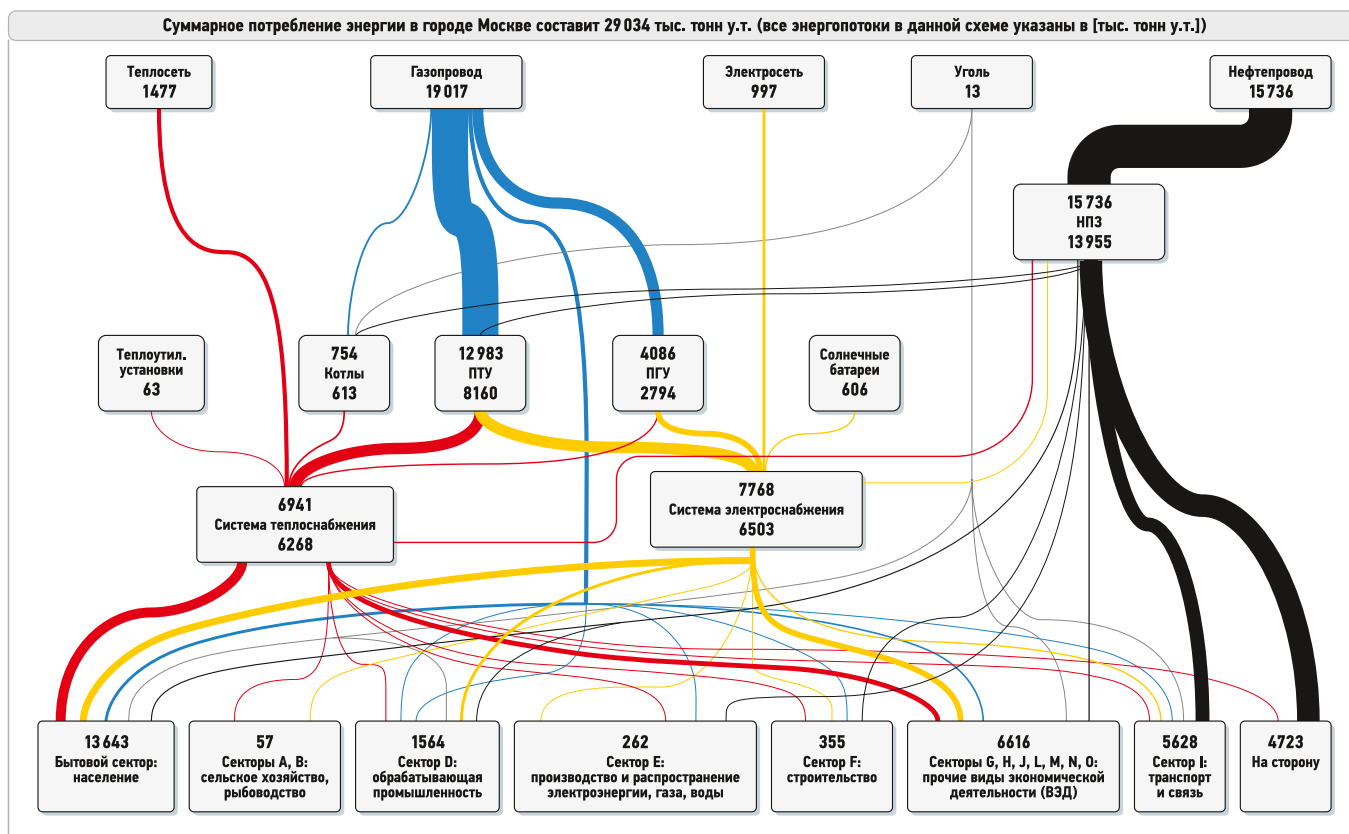


Рис. 5. ТЭБ Москвы, построенный в программе «ОптиТЭБ» после оптимизации

Оптимизация ТЭБ

В результате проведения данного исследования была сформулирована методология оптимизации ТЭБ с использованием современных энергоэффективных технологий, а также произведено исследование по оптимизации ТЭБ города Москвы при помощи программного обеспечения «ОптиТЭБ» [6, 7].

Для моделирования вышеуказанных энергосберегающих мероприятий используются оптимизируемые параметры и пределы их варьирования, представленные в табл. 4. Начальные значения параметров были определены по исходным данным ТЭБ (рис. 1). В качестве критерия оптимизации было рассмотрено минимальное потребление ТЭР.

При проведении оптимизационных расчётов получены оптимальные значения варьируемых параметров, также представленные в табл. 4. С учётом взаимного влияния этих переменных полу-

чен результат (рис. 5) от совместного внедрения энергосберегающих мероприятий (37,7 – 29,0 = 8,7 млн тонн у.т.), отличный от суммарного эффекта в табл. 1 (10,6 млн тонн у.т.).



Котлотурбинное отделение №2 ТЭЦ-20

Параметры оптимизации

Параметр	Минимум	Максимум	Начальные	Оптимальные
Коэффициент теплопотребления зданий	0,50	1,00	1,00	0,50
Доля котельных	0,10	0,50	0,42	0,10
Доля солнечных коллекторов	0,00	0,10	0,00	0,10
Доля ПГУ по тепловой нагрузке	0,05	0,15	0,06	0,15
Доля солнечных батарей	0,00	0,20	0,00	0,20
Доля электромобилей населения	0,00	0,90	0,00	0,90

табл. 4

Доли выработки энергии источниками рассчитываются от суммы потребляемых энергоресурсов. В зависимости от приоритета источника его доля в покрытии общей нагрузки определяется как остаток в пределах своего минимума и максимума для покрытия оставшейся потребности в энергоресурсах.

Таким образом, суммарное снижение расхода топливно-энергетических ресурсов в балансе Москвы от совместной реализации предложенных мероприятий в процессе оптимизации должно составить 8,7 млн тонн у.т. в год. Данные мероприятия также должны оказать существенное положительное влияние на экологические показатели системы и снизить выбросы парниковых газов на запланированную величину 15,2 млн тонн CO₂ в год.

На основе вышеприведённых данных можно сделать вывод, что оптимизация ТЭБ городов является важной задачей. При применении современных технологий достигается не только сокращение потребления ТЭР, но и существенное снижение вредных выбросов и их воздействия на здоровье населения. В 2015 году 94% (919 тыс. тонн) выбросов вредных веществ были связаны со сжиганием моторного топлива в двигателях внутреннего сгорания автомобилей (ДВС). Важную роль в сокращении вредных выбросов играет прежде всего городской переход на электротранспорт.



■ Московская ТЭЦ-23 (1420 МВт, 4530 Гкал/ч) введена в эксплуатацию в 1966 году

Если при увеличении доли электротранспорта вся потребляемая им электроэнергия будет вырабатываться на традиционных источниках (ТЭЦ, ТЭС и т.д.), то это неизбежно приведёт к переносу выбросов с городских улиц на трубы источников. Для получения положительного экологического эффекта необходимо увеличивать выработку энергии за счёт ВИЭ, чтобы исключить вредные выбросы, в том числе парниковые газы, как от ДВС автомобилей, так и от тепловых электростанций.

Заключение

Стратегическое планирование развития города на основе моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса является наиболее актуальной в текущих условиях задач. При этом использование современных программных средств позволяет существенно повысить

эффективность работы и снизить вероятность ошибки из-за «человеческого» фактора. Программное обеспечение «ОптиТЭБ» является эффективным средством для построения и оптимизации топливно-энергетических балансов.

В статье рассмотрены следующие энергосберегающие мероприятия: повышение тепловой защиты зданий; перераспределение тепловых нагрузок между котельными, ПГУ и ПТУ; строительство ПГУ на

Использование современных программных средств позволяет существенно повысить эффективность моделирования и оптимизации топливно-энергетического баланса и снизить вероятность ошибки из-за «человеческого» фактора

основе современных силовых установок взамен ПТУ; модернизация ТЭЦ с использованием абсорбционных трансформаторов теплоты (АТТ); увеличение доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе города; увеличение доли электротранспорта; использование технологии Vehicle-to-grid (V2G) передачи электроэнергии от электромобиля в сеть. По результатам проведённого исследования выявлено, что для использования энергосберегающего потенциала в первую очередь необходимо переводить тепловые нагрузки с котельных на ПГУ- и ПТУ-ТЭЦ, что будет соответствовать снижению потребления ТЭР на 8,9 %. Одновременно должен проводиться процесс снижения тепловой нагрузки зданий, что даёт 8,1 % уменьшения потребляемых энергоресурсов.

В результате проведения оптимизационного расчёта, с учётом взаимного влияния мероприятий друг на друга, эффект от совместной реализации должен составить 8,7 млн тонн у.т. в год (23 %). Также данные мероприятия должны привести к существенному снижению выбросов парниковых газов на 15,2 млн тонн CO₂ в год.

Результатами данной работы является разработка методологии стратегического планирования развития города с применением современного программного обеспечения «ОптиТЭБ». Она поможет систематизировать и улучшить процесс разработки стратегий развития топливно-энергетических комплексов городов, что является необходимым условием для устойчивого повышения уровня жизни. ●

- Мелентьев Л.А., Макаров А.А. Энергетический комплекс СССР. — М.: Экономика, 1983. 264 с.
- Антонов Н.В., Агафонова Ю.В., Чичеров Е.А., Шилин В.А. Топливо-энергетический баланс — основа перспективного прогнозирования. Энергобаланс Москвы // Энергосбережение, 2020. №5. С. 40–45.
- Актуализация схемы теплоснабжения города Москвы на период до 2035 года. — М.: ООО «ЭТС-Проект», 2020. 103 с.
- Разработка оптимального сводного топливно-энергетического баланса города Москвы за 2015 год, оперативного за 2016 год и прогнозного за 2017 год. — М.: ООО «Проектно-аналитический центр «Лорес», 2016.
- Филиппов С.П., Малахов В.А., Веселов Ф.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на энергию на основе системного анализа // Теплоэнергетика, 2021. №12. С. 5–19.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022662473 РФ. Программа моделирования и оптимизации топливно-энергетических балансов города «ОптиТЭБ» / А.И. Бартевев, И.Д. Калякин, Ю.В. Яворовский, А.П. Яшин, И.А. Султангузин; заявл. и правообл.: НИУ «МЭИ», №2022662473; заявл. 17.06.2022; опублик. 04.07.2022.
- Yavorovsky Y.V., Sultanguzin I.A., Bartenev A.I., Kalyakin I.D., Yashin A.P. Development of a program for creation of the fuel and energy balance of the city. Proc. of the 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2022). Moscow, Russia. March 17–19, 2022.
- Семикашев В.В. Теплоснабжение в России: текущая ситуация и проблемы инвестиционного развития // Эко, 2019. №9. С. 23–47.
- Ливчак В.И. Предложения по нормированию требований повышения энергоэффективности зданий нового строительства и жилищного фонда России // Энергосбережение, 2021. №7. С. 20–31.
- Крышов С.И., Курилюк И.С. Проблемы экспертной оценки тепловой защиты зданий // Жилищное строительство, 2016. №7. С. 3–5.
- Бисмарк М. Реконструкция в венском техническом университете // Здания высоких технологий, 2016. №4. С. 18–21.
- Султангузин И.А., Яворовский Ю.В., Жигулина Е.В., Калякин И.Д., Говорин А.В., Кролин А.А., Гужов С.В. Развитие системы энергоснабжения студгородка МЭИ на основе концепции «зелёного» строительства // Журнал СОК, 2018. №1. С. 106–109.
- Фортов В.Е., Шейндлин А.Е., Копсов А.А., Нечаев В.В., Кучеров Ю.Н., Шевченко И.С. О ходе реализации концепции технического перевооружения хозяйства Москвы и Московской области и задачи на будущее // Электрические станции, 2007. №11. С. 10–29.
- Яворовский Ю.В., Султангузин И.А., Бартевев А.И., Прищепова С.А., Трушин Е.С., Алимгазин А.Ш. Повышение энергетической и экологической эффективности теплоэлектроцентрали на основе применения абсорбционных трансформаторов теплоты // Вестник МЭИ, 2020. №4. С. 89–97.
- Zhang H.S., Zhao H.B., Li Z.L. Performance analysis of the coal-fired power plant with combined heat and power (CHP) based on absorption heat pumps. Journal of the Energy Institute, 2016. Vol. 89. Pp. 70–80.
- Chaikin V.Y., Sultanguzin I.A., Yavorovsky Y.V., Kalyakin I.D., Skorobatyuk A.V., Demidov E.A. Solar power plant for energy supply of building. Proc. of the 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2022). Moscow. March 17–19, 2022.
- Сидорович В. Солнечные электростанции будут обязательными для всех новостроек Гамбурга с 2023 года [Электр. текст]. RenEn от 07.12.2019. Режим доступа: renen.ru. Дата обрац.: 04.08.2022.
- Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive? IEA. Paris, France. June 2020. 276 p.
- Капустин А.А., Раков В.А. Экологическая безопасность электромобилей с точки зрения выбросов CO₂ // Автогазотранспортный комплекс + альтернативное топливо, 2018. №4. С. 178–182.
- Калашников В.И., Чепига А.А. Анализ концепции Vehicle-to-grid // Вестник ДонНТУ, 2019. №2. С. 89–94.
- О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году: инф.-аналит. доклад / Под ред. А.О. Кульбачевского. — М.: ДПИООС г. Москвы, 2018. 358 с.
- Султангузин И.А. Экологическая безопасность и энергоэффективность промышленных теплоэнергетических систем. — М.: Изд-во МЭИ, 2013. 288 с.
- Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: Инф.-техн. справ. по наилучшим доступным технологиям (ИТС 38-2017) / Дата введ.: 01.07.2018. — М.: Бюро НДТ, 2017. 280 с.

References — see page 80.

Methodology of strategic planning of city development based on modeling and optimization of fuel and energy balance. Pp. 72–79.

Ildar A. Sultanguzin, Doctor of Technical Sciences, Professor; **Yuriy V. Yavorovskiy**, PhD, Head of the Industrial Thermal Engineering Systems Department; **Alexey I. Bartenev**, postgraduate student; **Ivan D. Kalyakin**, postgraduate student, **National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI")**; **Alexey P. Yashin**, software engineer, "Everything for calendars", LLC

1. L.A. Melent'ev, A.A. Makarov. *Jenergeticheskij kompleks SSSR* [Energy complex of the USSR]. Moscow. *Jekonomika* ["The Economics" Publishers]. 1983. 264 p. [In Russian]
2. N.V. Antonov, Ju.V. Agafonova, E.A. Chicherov, V.A. Shilin. *Toplivno-jenergeticheskij balans — osnova perspektivnogo prognozirovaniya. Jenergobalans Moskvy* [Fuel and energy balance — the basis of long-term forecasting. Energy balance of Moscow]. *Jenergosberezhenie* ["Energy saving" Magazine]. 2020. No. 5. Pp. 40–45. [In Russian]
3. Aktualizacija shemy teplosnabzhenija goroda Moskvy na period do 2035 goda [Updating the heat supply scheme for the city of Moscow for the period up to 2035]. Moscow. OOO "JeTTs-Proekt" ["ETTs-Project", LLC]. 2020. 103 p. [In Russian]
4. Razrabotka otchetnogo svodnogo toplivno-jenergeticheskogo balansa goroda Moskvy za 2015 god, operativnogo za 2016 god i prognoznogo za 2017 god [Development of the reporting consolidated fuel and energy balance of the city of Moscow for 2015, operational for 2016 and forecast for 2017]. Moscow. OOO "Proektno-analiticheskij centr "Lores" ["Design and Analytical Center "Lores", LLC]. 2016. [In Russian]
5. S.P. Filippov, V.A. Malahov, F.V. Veselov. *Dolgosrochnoe prognozirovanie sprosa na jenergiyu na osnove sistemnogo analiza* [Long-term forecasting of energy demand based on system analysis]. *Teplojenergetika* ["Thermal power engineering" Magazine]. 2021. No. 12. Pp. 5–19. [In Russian]
6. Sv-vo o gos. reg-tsii programmy dlja JeVM 2022662473 RF [Certificate No. 2022662473 of state registration of the computer program of the Russian Federation]. *Programma modelirovaniya i optimizacii toplivno-jenergeticheskikh balansov goroda "OptiTeB"* [The "Opti-TEB" program for modeling and optimizing the fuel and energy balances of the city]. A.I. Bartenev, I.D. Kaljakin, Ju.V. Javorovskij, A.P. Jashin, I.A. Sultanguzin. Appl. and copyright holder: NRU "MPEI", No. 2022662473. Decl. on June 17, 2022. Publ. on July 4, 2022. [In Russian]
7. Y.V. Yavorovskiy, I.A. Sultanguzin, A.I. Bartenev, I.D. Kalyakin, A.P. Yashin. Development of a program for creation of the fuel and energy balance of the city. Proc. of the 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2022). Moscow, Russia. March 17–19, 2022.
8. V.V. Semikashov. *Teplosnabzhenie v Rossii: tekushhaja situacija i problemy investicionnogo razvitiya* [Heat supply in Russia: current situation and problems of investment development]. *Jeko* ["Eco" Magazine]. 2019. No. 9. Pp. 23–47. [In Russian]
9. V.I. Livchak. *Predlozhenija po normirovaniju trebovanij povyshenija jenergojeffektivnosti zdaniy novogo stroitelstva i zhilishhnogo fonda Rossii* [Proposals for standardizing the requirements for improving the energy efficiency of new construction buildings and the housing stock in Russia]. *Jenergosberezhenie* ["Energy saving" Magazine]. 2021. No. 7. Pp. 20–31. [In Russian]
10. S.I. Kryshov, I.S. Kuriljuk. *Problemy jekspertnoj ocenki teplovoj zashhity zdaniy* [Problems of expert assessment of thermal protection of buildings]. *Zhilishhnoe stroitelstvo* ["Housing construction" Magazine]. 2016. No. 7. Pp. 3–5. [In Russian]
11. M. Bismark. *Rekonstrukcija v venskom tehničeskom universitete* [Reconstruction at the Vienna Technical University]. *Zdaniya vysokih tehnologij* ["High technology buildings" Magazine]. 2016. No. 4. Pp. 18–21. [In Russian]
12. I.A. Sultanguzin, Ju.V. Javorovskij, E.V. Zhigulina, I.D. Kaljakin, A.V. Govorin, A.A. Krolin, S.V. Guzhov. *Razvitie sistemy jenergosnabzhenija studgorodka MJeI na osnove koncepcii "zeljonnogo" stroitelstva* [Development strategy of the energy supply system for Moscow Power Engineering Institute (MPEI) campus blocks based on green building]. *Zhurnal San-tehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2018. No. 1. Pp. 106–109. [In Russian]
13. V.E. Fortov, A.E. Shejndlin, A.A. Kapsov, V.V. Nechaev, Ju.N. Kuchero, I.S. Shevchenko. *O hode realizacii koncepcii tehničeskogo perevooruzhenija hozjajstva Moskvy i Moskovskoj oblasti i zadachi na budushhee* [On the implementation of the concept of technical re-equipment of the economy of Moscow and the Moscow region and tasks for the future]. *Jelektricheskie stancii* ["Electric power plants" Magazine]. 2007. No. 11. Pp. 10–29. [In Russian]
14. Ju.V. Javorovskij, I.A. Sultanguzin, A.I. Bartenev, S.A. Prishhepova, E.S. Trushin, A.Sh. Alimgazin. *Povyshenie jenergeticheskij i jekologicheskij jeffektivnosti teplojelektrocentrali na osnove primenenija absorbcionnyh transformatorov teploty* [Increasing the energy and environmental efficiency of a thermal power plant based on the use of absorption heat transformers]. *Vestnik MJeI* [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute]. 2020. No. 4. Pp. 89–97. [In Russian]
15. H.S. Zhang, H.B. Zhao, Z.L. Li. Performance analysis of the coal-fired power plant with combined heat and power (CHP) based on absorption heat pumps. *Journal of the Energy Institute*. 2016. Vol. 89. Pp. 70–80.
16. V.Y. Chaikin, I.A. Sultanguzin, Y.V. Yavorovskiy, I.D. Kalyakin, A.V. Skorobatyuk, E.A. Demidov. Solar power plant for energy supply of building. Proc. of the 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow. March 17–19, 2022.
17. V. Sidorovich. *Solnechnye jelektrostantsii budut objazatel'ny dlja vseh novostroek Gamburga s 2023 goda* [Solar power plants will be mandatory for all new buildings in Hamburg from 2023]. RenEn's publ. on December 7, 2019. Web-source: renen.ru. Access data: August 4, 2022. [In Russian]
18. Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive? IEA. Paris, France. June 2020. 276 p.
19. A.A. Kapustin, V.A. Rakov. *Jekologicheskaja bezopasnost' jelektromobilej s točki zrenija vybrosov CO₂* [Environmental safety of electric vehicles in terms of CO₂ emissions]. *Avtogazozapravochnyj kompleks + al'ternativnoe toplivo* ["Automatic gas refueling complex + alternative fuel" Magazine]. 2018. No. 4. Pp. 178–182. [In Russian]
20. V.I. Kalashnikov, A.A. Chepiga. *Analiz kontseptsii Vehicle-to-grid* [Analysis of the Vehicle-to-grid concept]. *Vestnik DonNTU* [Bulletin of Donetsk National Technical University]. 2019. No. 2. Pp. 89–94. [In Russian]
21. *O sostojanii okruzhajushhej sredy v gorode Moskve v 2017 godu: informacionno-analiticheskij doklad* [On the state of the environment in the city of Moscow in 2017: The information and analytical report]. Edited by A.O. Kul'bachevskiy. Moscow. DPiOOS g. Moskvy [Moscow Department of Nature Management and Environmental Protection]. 2018. 358 p. [In Russian]
22. I.A. Sultanguzin. *Jekologicheskaja bezopasnost' i jenergeticheskaja jeffektivnost' promyshlennyh teplojenergeticheskikh sistem* [Environmental safety and energy efficiency of industrial heat and power systems]. Moscow. *Izd-vo MJeI* [Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute]. 2013. 288 p. [In Russian]
23. *Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkah v celjah proizvodstva jenerгии: Informacionno-tehnicheskij spravocnik po nailuchshih dostupnym tehnologijam* (ITS 38-2017) [Combustion of fuel in large installations for energy production: Information and technical guide to the best available technologies (ITG No. 38-2017)]. Data of impl.: July 1, 2018. Moscow. *Bjuro NDT* [Bureau of Best Available Technologies]. 2017. 280 p. [In Russian]