

# Потенциал использования тепловых насосов для теплоснабжения станций метрополитена

С. Н. НАУМЕНКО<sup>1</sup>, Б. Н. МИНАЕВ<sup>2</sup>, И. А. РЕБРОВ<sup>1</sup>, Г. Б. ГУСЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»), Москва, 129626, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)), Москва, 127994, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены особенности работы пароконденционных теплонасосных установок как энергоэффективных систем. Описано устройство теплонасосной установки, перечислены ее основные компоненты. Представлен обзор существующей практики внедрения подобных систем в зарубежных странах, в том числе в ближнем зарубежье, и в России. Отдельно рассмотрен опыт по оценке потенциала и внедрению теплонасосных установок на станциях Московского метрополитена.

**Ключевые слова:** метрополитен; станция; теплоснабжение; источники низкопотенциальной теплоты; теплонасосные пароконденционные установки; энергетический баланс; энергосберегающие технологии

**Устройство и потенциал применения пароконденционных теплонасосных установок.** В настоящее время применению пароконденционных теплонасосных установок (ТНУ) как энергосберегающей технологии уделяется достаточно много внимания специалистами зарубежных и отечественных исследовательских организаций и промышленных фирм.

ТНУ — это экологически чистая система, которая позволяет преобразовать низкопотенциальную теплоту разнообразных источников (в частности, вторичных энергоресурсов) в теплоту более высокого потенциала, пригодную для использования потребителями.

На рис. 1 приведена принципиальная схема (а) и термодинамический цикл (б) пароконденционной ТНУ [1].

В качестве основных элементов ТНУ включает в себя компрессор, конденсатор, дроссель, испаритель. В компрессоре III рабочее вещество (например, хладон), поступающее из испарителя, сжимается. При сжатии в компрессоре газообразный хладон нагревается (до 80 °С). В конденсаторе II (рекуперативном теплообменнике с фазовым переходом) перегретые пары хладона охлаждаются до температуры конденсации. Дальнейшее охлаждение паров хладона приводит к их конденсации (сжижению). При конденсации выделяется теплота, которую используют для нагрева до 60 °С воды, поступающей в систему теплоснабжения. В испарителе I за счет подводимой от низкотемпературного источника теплоты парожидкостная смесь

хладона испаряется, его пары поступают в компрессор и цикл повторяется.

Энергетический баланс ТНУ можно записать в виде

$$q_k = q_o + l_n.$$

Эффективность работы ТНУ оценивается по значению коэффициента трансформации:

$$\mu = q_k / l_n,$$

величина которого возрастает с повышением температуры низкопотенциального источника.

Современные компрессорные установки позволяют получить на 1 кВт потребляемой ТНУ мощности 3–4 кВт, а при определенных условиях и до 5–6 кВт полезной мощности.

Сегодня ТНУ находят наибольшее применение в системах теплоснабжения жилых и офисных зданий, особенно в странах Скандинавии, Германии, Швейцарии, США, Японии, Китая. Доля нагрузки при теплоснабжении, обеспечиваемом ТНУ, достигает в США 37 %, в Швейцарии и Австрии — более 50 % [1]. По прогнозу Мирового энергетического комитета (МИРЭК), к 2020 г. в передовых странах доля отопления и горячего водоснабжения от ТНУ составит не менее 75 % [2, 3].

В настоящее время в мире эксплуатируется более 10 млн ТНУ мощностью от десятков киловатт до нескольких мегаватт. Ежегодно парк ТНУ пополняется примерно на 1 млн единиц. В 2004 г. мощность ТНУ, установленных в Европе, составляла 4531 МВт, а во всем мире с использованием ТНУ была получена тепловая энергия, эквивалентная 1,81 млрд м<sup>3</sup> природного газа. Широкому распространению ТНУ во многих странах способствует рост цен на энергоносители, ужесточение требований законодательств этих стран по энергосбережению при производстве, распределении и потреблении энергии, а также по снижению вредных выбросов в окружающую среду от теплоэнергетических установок, в частности парниковых газов при сжигании топлива. Важно отметить при этом, что рынки ТНУ за рубежом формируются, как правило,

■ E-mail: [naumenko.sergey@vniizht.ru](mailto:naumenko.sergey@vniizht.ru) (С. Н. Науменко)

при поддержке государства. Компании, предлагающие ТНУ, пользуются налоговыми льготами, а домовладельцы, приобретающие такое оборудование, получают дотации, субсидии, льготные кредиты.

Относительно низкие цены на топливно-энергетические ресурсы, а также климатические особенности России ограничивают область эффективного применения ТНУ (с высоким коэффициентом трансформации) на территории нашей страны для целей теплоснабжения, за исключением, может быть, южных районов и в меньшей степени регионов средней полосы [4].

Тем не менее в проекте Энергетической стратегии России на период до 2035 г., разработанном во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 06.07.2013 г., № Пр-1417, ТНУ рассматриваются как эффективные энергетические системы будущего без регионального ограничения [5]. В проекте Стратегии указывается, что «...необходимо решить задачу максимальной реализации имеющегося потенциала энергосбережения и повысить энергетическую эффективность во всех отраслях экономики до уровня мировых практик. Для этого следует использовать весь арсенал инструментов развития энергосбережения и повышения энергоэффективности, доказавших свою результативность в мировой практике». Одним из них является производственный потенциал вторичных энергетических ресурсов, не зависящий от климатических особенностей страны.

**Возможности использования вторичных энергетических ресурсов метрополитена в качестве источника низкопотенциальной энергии.** В зарубежных странах проектам использования вторичных энергетических ресурсов метрополитена уделяется много внимания. По информации агентства «РБК daily» и иных электронных ресурсов, компания Paris Habitat, которая предоставляет жителям французской столицы коммунальные услуги, с 2011 г. обогревает 17 квартир жилого дома, расположенного над станцией метро, за счет избыточной теплоты, выделяемой при движении электропоездов, силовыми трансформаторами, от пассажиропотоков и пр. В метрополитене Стокгольма аналогичные тепловыделения позволяют нагревать воду, которая затем применяется для отопления 13-этажного офисного здания. Разумеется, эту теплоту с помощью ТНУ можно использовать и для отопления помещений станции метрополитена.

**Минский метрополитен.** Специалисты ОАО «Минскметропроект» на основании расчетов, выполненных на примере одной из конечных станций метрополитена юга Москвы, показали, что в холодный период года на расчетном участке метрополитена выделяется избыточная теплота в количестве 3,5 МВт, которую необходимо удалять с помощью тоннельной вентиляции. При этом для обогрева помещений станции оказалось достаточным 1 МВт тепловой энергии, поступающей

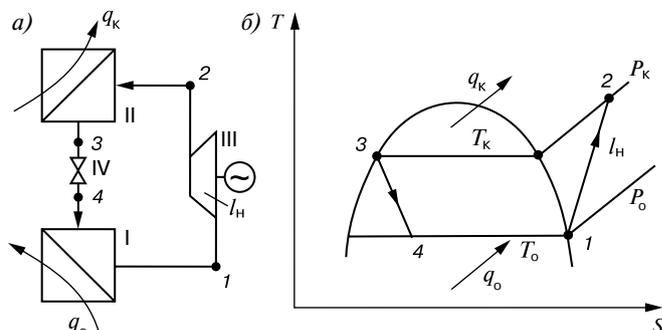


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и термодинамический цикл (б) парокompрессионной ТНУ: I — испаритель; II — конденсатор; III — компрессор; IV — дроссель; 1–2 — процесс сжатия пара в компрессоре; 2–3 — процесс переохлаждения и конденсации в конденсаторе; 3–4 — процесс дросселирования; 4–1 — процесс испарения хладона в испарителе;  $P_k$ ,  $T_k$  — давление и температура в конденсаторе;  $P_o$ ,  $T_o$  — давление и температура в испарителе;  $q_k$  — удельная (на 1 кг рабочего агента) теплота, отведенная в конденсаторе;  $q_o$  — удельная теплота, подведенная к хладону в испарителе;  $l_n$  — удельная работа, затраченная на привод компрессора. (В TS-диаграмме парабола называется пограничной кривой, характеризующей состояние рабочего вещества ТНУ — в данном случае хладона, находящегося соответственно в жидком (слева от параболы), паро-жидком (внутри параболы) или перегретом (справа от параболы) состоянии.)

Fig. 1. Schematic diagram (a) and thermodynamic cycle (b) of the vapor compression HPP: I — evaporator; II — condenser; III — compressor; IV — throttle; 1–2 — process of compression of steam in the compressor; 2–3 — process of sub-cooling and condensation in the condenser; 3–4 — throttling process; 4–1 — evaporation of halocarbon in the evaporator;  $P_k$ ,  $T_k$  — pressure and temperature in the condenser;  $P_o$ ,  $T_o$  — pressure and temperature in the evaporator;  $q_k$  — specific heat (per 1 kg of working agent) in the condenser;  $q_o$  — specific heat supplied to the halocarbon in the evaporator;  $l_n$  — specific work spent on the compressor drive. (In the TS-diagram parabola is the boundary curve characterizing the state of the working substance of the HPP — in this case the halocarbon, which is respectively in the liquid (to the left of the parabola), vapor-liquid (inside the parabola) or superheated (to the right of the parabola) state.)

из внешних тепловых сетей. Поэтому было предложено использовать «сбросное» тепло, отказавшись от закупок у поставщика тепловой энергии. В 2013 г. это предложение удалось реализовать в рамках пилотного проекта по отоплению трех станций Минского метрополитена. Для этого были установлены ТНУ марки ТН-18К и ТН-23К типа «воздух — вода», заменившие ранее подключенные к кабельным электросетям Минска электронагревательные котлы (рис. 2).

Источником низкопотенциальной тепловой энергии является воздух из транспортного тоннеля. ТНУ работали только в отопительный период. Коэффициент трансформации составил  $\mu = 3,0$ . К настоящему времени на Минском метрополитене установлено уже 22 ТНУ общей мощностью 403 кВт [6]. Сам проект продолжает развиваться.

**Московский метрополитен** в этом отношении более консервативен. Еще в 2012 г. АО «ВНИИЖТ» анонсировал на ВВЦ, в том числе для московского метрополитена, проект по использованию «сбросного» тепла вентиляционных шахт для нужд отопления и горячего



Рис. 2. Теплонасосная установка типа «воздух — вода» на ст. «Михалово», Минский метрополитен  
Fig. 2. “Air — water” heat pump plant at the station “Mikhalovo”, Minsk metro system

водоснабжения. В Московском метрополитене на тот момент имелось более 350 вентиляционных шахт, необходимых для удаления теплого воздуха из тоннелей в окружающую среду города. Из вентиляционных шахт воздух выходит с температурой 12–17 °С. С помощью ТНУ, испаритель которой располагается внутри шахты, а компрессор и конденсатор (например, бойлер) за пределами канала для прохода воздуха, можно преобразовать теплоту низкого потенциала в теплоту более высокого потенциала с температурами 65 °С (при одноступенчатой схеме применения ТНУ) или 95 °С (при двухступенчатой). При этом горячую воду, нагретую в бойлере за счет «сбросного» тепла вентиляционного воздуха метрополитена, можно использовать для отопления и/или горячего водоснабжения объектов инфраструктуры, расположенных поблизости.

По данным расчетов, выполненных специалистами АО «ВНИИЖТ» и МИИТ, при существующем воздушном потоке 50–70 м<sup>3</sup>/с и затраченной на преобразование теплоты электрической энергии 100–120 кВт·ч количество полученной тепловой энергии более высокого потенциала из одной шахты может составить не менее 400 кВт·ч, что оказывается вполне достаточным для отопления, например, 40 двух-трехкомнатных квартир площадью 100 м<sup>2</sup> каждая многоэтажного кирпичного здания или помещений инфраструктуры станций метрополитена. При стоимости в Москве 1 кВт·ч электроэнергии, равной 3,8 руб. (по ценам 2012 г.), расчетная стоимость 1 кВт·ч преобразованной тепловой энергии составляла 0,96 руб., тогда как покупка теплоты у города для нужд метрополитена достигала величины 1,46 руб. за 1 кВт·ч.

Ожидаемые затраты на реализацию рассмотренного проекта при использовании одноступенчатой схемы ТНУ составляли по предварительной оценке

порядка 7 млн руб. на одну шахту и могли окупиться примерно через 5–6 лет. Для двухступенчатой схемы ТНУ расчетные затраты на ее реализацию составили около 10 млн руб. со сроком окупаемости проекта в 6–7 лет. Оснащение ТНУ всех вентиляционных шахт Московского метрополитена позволяло городу экономить свыше 500 млн руб. в год с учетом планируемых затрат на их техническое обслуживание при минимальном жизненном цикле в 30 лет.

Следует отметить, что катализатором для разработки инициативного проекта института для метрополитена явился практический опыт АО «ВНИИЖТ» по эффективному применению в 2011 г. ТНУ для отопления и горячего водоснабжения здания компрессорной на сортировочной горке станции Бекасово Московской дороги за счет использования тепловой энергии низкого потенциала из систем водяного охлаждения компрессоров [7, 8].

В 2012 г. специалисты АО «ВНИИЖТ» совместно с работниками электромеханической службы Московского метрополитена рассмотрели вариант технического решения использования «сбросного» тепла, описанный в [9], применительно к системам теплоснабжения станций метрополитена «Нагатинская» и «Пушкинская». Для оценки целесообразности применения ТНУ в системах теплоснабжения указанных станций были использованы сведения по тепловым нагрузкам, полученные из опыта проектирования и эксплуатации Московского метрополитена для климатических условий столицы.

Результаты обследования станций подтвердили предположение, что использование ТНУ в перспективе покажет однозначную эффективность. Станция «Нагатинская» Серпуховского радиуса Московского метрополитена не имела возможности подключения к городским тепловым сетям, и ее теплоснабжение осуществлялось от котельной ООО «Прачечная 7» при относительно высокой стоимости единицы тепловой энергии. Поэтому в проекте были рассмотрены возможности и целесообразность замены существующей схемы теплоснабжения на схему теплоснабжения с ТНУ. При этом предполагалось, что ТНУ будут эксплуатироваться только в отопительный период для покрытия тепловых нагрузок двух вестибюлей станции «Нагатинская» за счет низкопотенциальной теплоты от источников тепловыделений метрополитена в количестве 2108,33 Гкал/год [10].

Расчеты, выполненные для системы теплоснабжения станции «Нагатинская» с учетом результатов обследования, показали, что внедрение ТНУ позволяет устранить зависимость поставок тепловой энергии от стороннего источника. Следует отметить, что при достаточно высоких начальных капиталовложениях возможно обеспечить приемлемый срок окупаемости ТНУ — менее 4-х лет при сроке службы установлен-

ного основного оборудования до 30 лет. По ряду причин дальнейшего развития в Москве проект не получил. Как было изложено выше, данная технология пока успешно развивается только в Минске.

Вместе с тем, сегодня появились шансы вернуться к реализации технологии использования ТНУ на станциях Московского метрополитена. Как следует из [11], компания ОАО «Инсолар Инвест» опубликовала результаты исследований, посвященных повышению энергетической эффективности объектов Московского метрополитена, выполненных при финансовом участии Департамента градостроительной политики города Москвы. Согласно данным компании, на станции «Саларьево» Московского метрополитена в 2017 г. реализован подобный пилотный проект по использованию ТНУ в системе теплоснабжения станции, предложенный ранее АО «ВНИИЖТ». В выводах специалистов отмечается, что Московский метрополитен выбрасывает в окружающую среду около 2,2 млрд кВт·ч низкопотенциальной тепловой энергии в год. Технологии, использующие тепловые насосы, позволяют уже сегодня утилизировать это вторичное тепло и применять его для энергетически эффективного отопления близлежащих зданий и сооружений, торговых павильонов, жилых домов, обогрева тротуаров и площадей перед станциями и пр. Ориентировочные расчеты показывают, что только за счет подключения сторонних потребителей тепла к таким системам теплоснабжения Московский метрополитен (по тарифам ПАО «МОЭК» на подключение тепловой нагрузки) мог бы получить доход, превышающий 4 млрд руб., не считая ежегодного дохода от продажи тепловой энергии.

**Выводы.** 1. Метрополитены являются значительными источниками низкопотенциальной теплоты, которую с помощью ТНУ можно использовать для теплоснабжения станций.

2. К настоящему времени имеется большой опыт (в особенности за рубежом) практического применения ТНУ в системах теплоснабжения объектов. Тем не менее для надежной и всесторонней оценки технико-экономической эффективности проектов использования низкопотенциальной теплоты метрополитенов как энергосберегающей технологии требуется проведение комплекса исследований, включающего эксплуатационные испытания реализуемых в настоящее время пилотных проектов.

3. По прогнозу Мирового энергетического комитета (МИРЭК), к 2020 г. в передовых странах доля отопления и горячего водоснабжения от ТНУ составит не менее 75%. В связи с этим внедрение ТНУ для полезного преобразования низкопотенциальной теплоты от источников тепловыделений метрополитенов имеет огромный потенциал к реализации для всех метрополитенов страны и мира.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / О. Л. Данилов [и др.] / под ред. А. В. Клименко. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 424 с.
2. Гаврилова С. Г. Тепловые насосы для России: технология использования геотермального и сбросного тепла предприятиями // Тепловые насосы. Электронный журнал. № 4. 2008. URL: <http://esco.co.ua> (дата обращения: 12.04.2018 г.).
3. Lund J. W., Boyd T. L. Direct utilization of geothermal energy 2015: worldwide review // Proceedings World Geothermal congress. Melbourne, Australia, 19–25 April, 2015. [s. l.], 2015. P. 31.
4. Анализ трендов развития электрогенерации и оценка перспектив применения инновационных энергоэффективных технологий на транспорте / А. Б. Косарев [и др.] // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2018. № 3. С. 51–62.
5. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года: проект в ред. от 01.02.2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920> (дата обращения: 10.04.2018 г.).
6. Тепловые насосы производства «Геотерматекс» [Электронный ресурс] // Геотерматекс: офиц. сайт. URL: <http://telemiks.by/geo/enterprise.html> (дата обращения: 12.04.2018 г.).
7. Перспективы использования тепловых насосов на горочных комплексах железных дорог / С. Н. Науменко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 4. С. 25–29.
8. Устройство охлаждения компрессора на горочных комплексах (варианты): пат. на ПМ № 115118 Рос. Федерация: МПК G12B 15/00 (2006.01) / С. Н. Науменко, Н. М. Костин, М. Д. Филиппов; заявитель HYPERLINK. 2011147971/28; заявл. 25.11.2011; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11; приоритет от 25.11.2011.
9. Система использования сбросного тепла метрополитена: пат. на ПМ № 120753 Рос. Федерация: МПК: F24F 12/00 (2006.01), F24D 15/04 (2006.01) / А. Б. Косарев, С. Н. Науменко, Н. М. Костин; заявитель HYPERLINK. 2012117888/07; заявл. 02.05.2012; опубл. 27.09.2012, Бюл. № 27; приоритет от 02.05.2012.
10. Использование тепловых насосов для теплоснабжения станций метрополитена / Б. Н. Минаев [и др.] // Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий. Инфраструктура и подвижной состав метрополитена: тр. Международной выставки-конференции «Интерметро-2017» / под общей ред. Т. В. Шепитько [и др.]. М.: МИИТ, 2017. С. 96–97.
11. Теплонасосные системы теплоснабжения объектов Московского метрополитена [Электронный ресурс] / Г. П. Васильев [и др.] // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). 2018. № 2. С. 14–26. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6859](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6859) (дата обращения: 09.04.2018 г.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### НАУМЕНКО Сергей Николаевич,

д-р техн. наук, главный научный сотрудник, отдел «Системы тягового электроснабжения железных дорог», АО «ВНИИЖТ»

### МИНАЕВ Борис Николаевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика на железнодорожном транспорте», ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

### РЕБРОВ Илья Алексеевич,

начальник центра научно-технических компетенций в области электроснабжения и электрификации железных дорог (ЦНТКЭ), АО «ВНИИЖТ»

### ГУСЕВ Глеб Борисович,

канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика железнодорожного транспорта», ФГБОУ ВО РУТ (МИИТ)

Статья поступила в редакцию 17.05.2018 г., принята к публикации 31.07.2018 г.

## Potential for the use of heat pumps for heat supply of metro stations

S. N. NAUMENKO<sup>1</sup>, B. N. MINAEV<sup>2</sup>, I. A. REBROV<sup>1</sup>, G. B. GUSEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Joint Stock Company "Railway Research Institute" (JSC "VNIIZhT"), Moscow, 129626, Russia

<sup>2</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (FGBOU VO RUT (MIIT), Moscow, 127994, Russia

**Abstract.** At present, specialists of foreign and domestic research organizations and industrial firms pay much attention to the use of steam compression heat pump plants (HPP) as an energy-saving technology. Modern compressor units allow receiving 3–4 kW for 1 kW of power consumed by HPP, and under certain conditions up to 5–6 kW of useful power. Today HPPs are most used in heat supply systems for residential and office buildings, especially in Scandinavia, Germany, Switzerland, USA, Japan, China.

The paper discusses features of the operation of steam compressor heat pump plants as systems for improving energy efficiency with a description of the device of a heat pump plant; its main components are also listed. Review of the existing practice of introducing such systems in foreign countries is presented, including in Minsk — the Minsk metro, and in Russia — the Moscow Metro. The project, performed by specialists of JSC "VNIIZhT" and MIIT, is considered for the Moscow Metro (with reference to the heating systems of the Nagatinskaya and Pushkinskaya metro stations) for the use of dumping heat of ventilation shafts for heating and hot water supply, proposed by scientists of JSC "VNIIZhT" in 2012 within the framework of the exhibition of technical achievements. Authors presented information on the implementation of the pilot project at the station "Salar'yevo" (Moscow Metro) on the use of HPP in the heat and cooling supply system of the station for further comprehensive analysis of the effectiveness of the HPP application in the operating conditions of the metro. From the analysis of the data given in the work, it is concluded that metro systems are significant sources of low-potential heat, which can be used for the heat supply of stations and/or nearby urban sites by means of HPP.

By now, there is a lot of experience (especially abroad) of the practical application of HPP in the heat supply systems of facilities. Nevertheless, for a reliable and comprehensive assessment of the feasibility and cost-effectiveness of projects using low-potential heat of metro systems as an energy-saving technology, a complex of studies is needed, including operational tests of currently implemented pilot projects.

**Keywords:** metro systems; station; heat supply; sources of low-potential heat; heat pump steam compression plants; energy balance; energy saving technologies

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.21780/2223-9731-2018-77-4-200-204>

### REFERENCES

1. Danilov O. L., Garyaev A. B., Yakovlev I. V., Klimenko A. V. *Energoberezhenie v teploenergetike i teplotekhnologiyakh* [Energy saving in heat power engineering and heat technologies]. Moscow, Publishing House MEI, 2010, 424 p.
2. Gavrilova S. G. *Teplovye nasosy dlya Rossii: tekhnologiya ispol'zovaniya geotermal'nogo i sbrosnogo tepla predpriyatiyami* [Heat pumps for Russia: technology of geothermal and dumping heat utilization by enterprises]. *Teplovye nasosy* [Heat Pumps], no. 4, 2008. URL: <http://esco.co.ua> (retrieved on 12.04.2018).
3. Lund J. W., Boyd T. L. *Direct utilization of geothermal energy 2015: worldwide review*. Proceedings World Geothermal congress. Melbourne, Australia, 19–25 April, 2015. [s. l.], 2015. P. 31.
4. Kosarev A. B., Naumenko S. N., Zaruchevskiy A. V., Rebrov I. A. *Analiz trendov razvitiya elektrogeneratsii i otsenka perspektiv primeneniya innovatsionnykh energoefektivnykh tekhnologiy na transporte* [Analysis of trends in the development of power

generation and assessment of the prospects for the use of innovative energy-efficient technologies in transport]. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Bulletin of the Joint Scientific Council of the JSC "Russian Railways"], 2018, no. 3, pp. 51–62.

5. *Energy strategy of Russia for the period up to 2035*. The project in edition from 01.02.2017. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920> (retrieved on 10.04.2018) (in Russ.).

6. *Heat pumps produced by Geothermatex*. URL: <http://telemiks.by/geo/enterprise.html> (retrieved on 12.04.2018) (in Russ.).

7. Naumenko S. N., Minaev B. N., Filippov M. D. *Perspektivy ispol'zovaniya teplovykh nasosov na gorochnykh kompleksakh zheleznnykh dorog* [Prospects for the use of heat pumps on the hump complexes of railways]. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute], 2012, no. 4, pp. 25–29.

8. Naumenko S. N., Kostin N. M., Filippov M. D. *Compressor cooling device on the hump complexes (options)*. Patent for the utility model PM no. 115118.

9. Kosarev A. B., Naumenko S. N., Kostin N. M. *Utilization of metro dumping heat*. Patent for utility model PM no. 120753.

10. Minaev B. N., Naumenko S. N., Kostin N. M., Gusev G. B., Shepit'ko T. V. *Ispol'zovanie teplovykh nasosov dlya teplosnabzheniya stantsiy metropolitena* [The use of heat pumps for the heat supply of metro stations]. *Perspektivy razvitiya metropolitenov v usloviyakh intensivnogo vnedreniya novykh tekhnologiy. Infrastruktura i podvizhnoy sostav metropolitena*. Tr. Mezhdunarodnoy vystavki-konferentsii "Intermetro-2017" [Prospects for the development of subways in conditions of intensive introduction of new technologies. Infrastructure and rolling stock of the subway. Works of the International Exhibition and Conference "Intermetro-2017"]. Moscow, MIIT Publ., 2017, pp. 96–97.

11. Vasil'ev G. P., Gornov V. F., Shapkin P. V., Popov M. I., Burmistrov A. A. *Teplozasnyye sistemy teplokhladonasbzheniya ob"ektov Moskovskogo metropolitena* [Heat pump systems of heat-cooling supply of objects of the Moscow underground]. *Ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukh, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika (AVOK)* [Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics], 2018, no. 2, pp. 14–26. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6859](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6859) (retrieved on 09.04.2018).

### ABOUT THE AUTHORS

#### Sergey N. NAUMENKO,

Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Department "Systems of traction power supply of railways", JSC "VNIIZhT"

#### Boris N. MINAEV,

Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department "Heat power engineering in railway transport", FGBOU VO RUT (MIIT)

#### Ilya A. REBROV,

Head of the center for scientific and technical competencies in power supply and electrification of railways (TsNTKE), JSC "VNIIZhT"

#### Gleb B. GUSEV,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department "Heat power engineering in railway transport", FGBOU VO RUT (MIIT)

Received 17.05.2018

Accepted 31.07.2018

■ E-mail: [naumenko.sergey@vniizht.ru](mailto:naumenko.sergey@vniizht.ru) (S. N. Naumenko)