



Теплонасосные системы теплохладоснабжения объектов Московского метрополитена

Г. П. Васильев, доктор техн. наук, научный руководитель ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ», insolar-invest@yandex.ru

В. Ф. Горнов, директор проектного отделения ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

П. В. Шапкин, коммерческий директор ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

М. И. Попов, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

А. А. Бурмистров, начальник отдела АСУТП ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ»

Ключевые слова: тепловой режим, теплонасосная система теплохладоснабжения, тепловой насос, утилизация тепловой энергии, рекуперация тепловой энергии, подземное сооружение, метрополитен

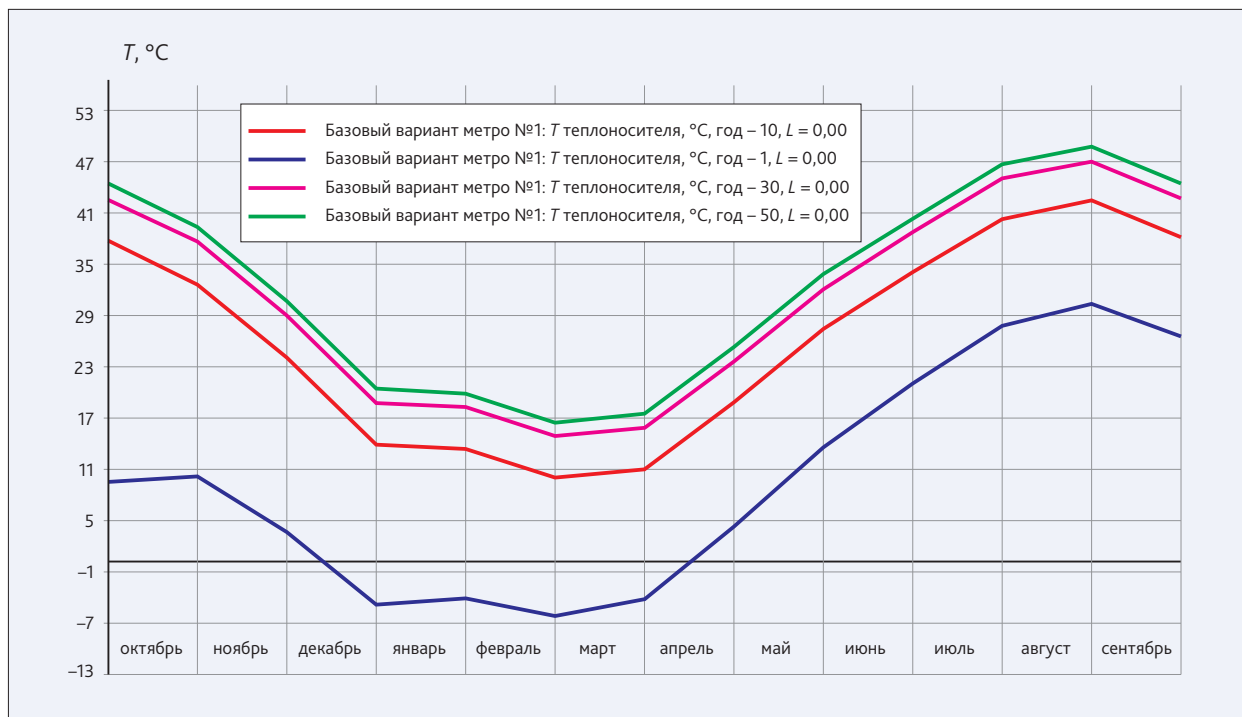
Окончание. Начало см. «АВОК», № 1, 2018.

Предпосылки для использования тепллонасосных систем на объектах Московского метрополитена

Численные эксперименты по прогнозу теплового поведения подземных объектов Московского метрополитена показывают, что при многолетней эксплуатации, имеющих сегодня место пассажиропотоков и применяемых технологиях вентиляции метрополитена обеспечение в тоннелях и на станциях нормативных параметров микроклимата физически невозможно (рис. 4). Как показывают расчеты, многолетняя эксплуатация Московского метрополитена при сохранении неизменными существующие технологии вентиляции на временном горизонте 30 лет в жаркое время года приведет к ненормативному

увеличению температур внутреннего воздуха в тоннелях до 42 °С к 10-му году эксплуатации и до 47 °С к 30-му году эксплуатации, а на станциях – до 34 и 42 °С соответственно. Важно отметить, что при проведении численных экспериментов все имеющиеся информативные неопределенности в исходных данных трактовались «в пользу» применения существующих технологий. Так, например, в расчетах допускались отрицательные температуры внутреннего воздуха в тоннеле и окружающих слоях грунта без снижения объемов подачи приточного воздуха, чего в действительности не допускается, вследствие чего снижается возможность аккумулирования холода в грунте в зимнее время года [17].

Результаты численных экспериментов показывают, что дальнейшая многолетняя эксплуатация Московского метрополитена без подогрева приточного воздуха системы вентиляции в зимнее время года и охлаждения в жаркое время года **недопустима**.

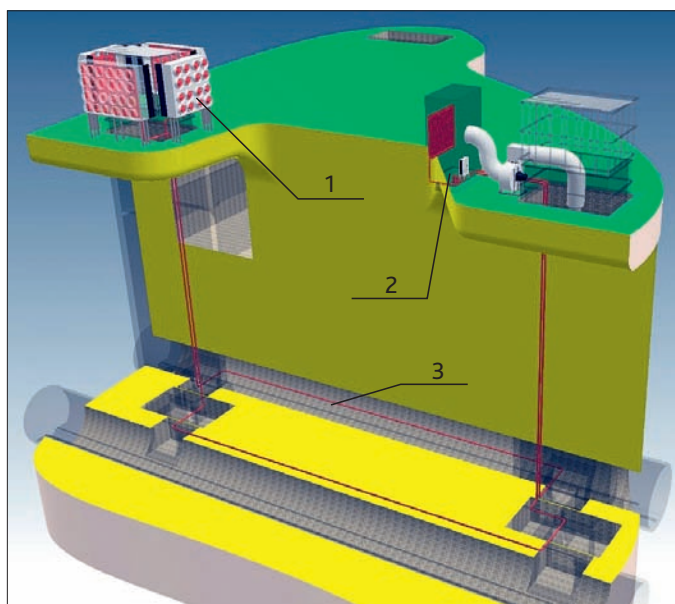


■ Рис. 4. Прогноз изменения температуры внутреннего воздуха на станциях метрополитена при сохранении применяемых технологий вентиляции и условия обеспечения нормативного воздухообмена

Физически невозможно обеспечить нормируемые и безопасные для пассажиров параметры микроклимата в пассажирском пространстве без модернизации применяемых технологий вентилирования подземных сооружений. Важно отметить, что с увеличением пассажиропотоков в Московском метрополитене эта ситуация будет только усугубляться. Кроме того, негативное влияние на ситуацию оказывают наблюдающиеся в Москве тренды повышения температур наружного воздуха и температур грунта, окружающего подземные объекты метрополитена. Неучет этих обстоятельств может в ближайшем будущем при наступлении жаркого лета (близкого к 2010 году) привести к тепловому коллапсу в Московском метрополитене.

Применяемые сегодня устаревшие технологии обеспечения микроклимата на подземных объектах Московского метрополитена не могут поддерживать значения параметров микроклимата на нормативном и безопасном для пассажиров уровне. Эта ситуация негативно отражается на конкурентоспособности общественного транспорта Москвы в целом и метрополитена в частности, что, в свою очередь, может нанести серьезный ущерб политике Правительства Москвы по существенному увеличению доли общественного городского транспорта в пассажиропотоке города.

Эксплуатация подземных объектов метрополитена и связанные с ним сброс/потребление тепловой энергии из грунтового массива к концу отопительного сезона вызывают понижение температуры окружающего массива грунта, а к концу жаркого периода года его повышение. При этом, как показывают численные эксперименты, в геоклиматических условиях города Москвы его нагрев в летний период года не успевает компенсироваться в течение отопительного сезона, и к началу следующего отопительного сезона грунт выходит с повышенным температурным потенциалом. Потребление и сброс тепловой энергии в грунт в течение следующего года вызывают дальнейшее повышение температуры грунта, и к началу третьего отопительного сезона его температурный потенциал под воздействием эксплуатационных тепловыделений от поездов и пассажиропотоков еще увеличивается и все больше отличается от естественного. И так далее. Отметим, что огибающие теплового влияния многолетней эксплуатации метрополитена на естественный температурный режим грунта имеют ярко выраженный экспоненциальный характер, и к пятому году эксплуатации грунт выходит на новый режим, близкий к периодическому. То есть, начиная с пятого года, многолетнее эксплуатационное влияние метрополитена на окружающий грунтовой массив сопровождается периодическими изменениями



■ Рис. 5. Иллюстрация предлагаемого схемного решения теплонасосной системы рекуперации и утилизации теплоты вытяжного воздуха системы вентиляции метрополитена: 1 – блок утилизации вытяжного воздуха в наружном исполнении; 2 – блок подогрева приточного воздуха; 3 – тоннели метрополитена и трубопроводы, соединяющие блоки

его (грунтового массива) температуры. Поэтому при проектировании подземных объектов метрополитена и определении энергетических нагрузок на его климатические системы необходимо учитывать изменение (увеличение) температур окружающего грунтового массива, вызванное многолетней эксплуатацией метрополитена, и использовать в качестве расчетных параметров и температур грунтового массива параметры и температуры грунта, ожидаемые не менее чем на пятый год эксплуатации

проектируемого подземного объекта метрополитена [18–19].

За отопительный период года с вытяжным воздухом системы вентиляции Московского метрополитена в атмосферу города с 1 км двухпутной линии «выбрасывается» около 6900 МВт·ч тепловой энергии. При вторичном использовании этой энергии с помощью теплонасосных систем теплоснабжения возможно обеспечить отопление 125 тыс. м² жилых домов. Если пересчитать на общую длину линий Московского метрополитена, то за счет вторичного использования «сбросного тепла» его вентиляционных выбросов можно отопить 37,5 млн м² жилья.

Предпочтительной технологией повышения энергоэффективности и улучшения микроклимата на подземных объектах Московского метрополитена является рекуперация «сбросного» тепла/холода вытяжного воздуха в вытяжных вентиляционных шахтах и подогрев/охлаждение приточного воздуха в приточных вентшахтах с включением в незамерзающий гидравлический контур рекуперации теплонасосного оборудования (рис. 5).

Схема предусматривает 30%-ную рекуперацию теплоты вытяжного воздуха в зимнее время года и 15%-ную рекуперацию «холода», удаляемого с вытяжным воздухом, в жаркое время года. Более предпочтительным является одноступенчатый вариант реализации схемы. В этом варианте конденсатор теплового насоса непосредственно встроен в гидравлический контур по ходу теплоносителя перед теплообменником, нагревающим приточный воздух, а испаритель – после него, перед теплообменником, охлаждающим вытяжной воздух. В жаркое время года теплонасосное оборудование реверсируется и охлаждает приточный



■ Рис. 6. ТНП станции «Саларьево»

Таблица 2

Основные проектные характеристики теплогенерирующего оборудования ТНП-1 и ТНП-2 станции «Саларьево»

№	Наименование параметра	Величина
1	Теплонасосная установка INSOLAR-H-Rsj-45T3N, ед.	2
2	Теплопроизводительность теплонасосных установок (ТНУ) на расчетном режиме, кВт	85
3	Холодопроизводительность теплонасосных установок (ТНУ) на расчетном режиме, кВт	32,6
4	Температура подачи в систему отопления, °С	60
5	Источник низкопотенциальной энергии	Воздух в тоннеле
6	Резервный источник теплоснабжения – электродкотел, кВт	99
7	Суммарная электрическая установленная мощность теплового узла (без учета мощности электродкотла), кВт	55

воздух, а «сброс» избыточного тепла осуществляется через теплообменник, встроенный в вытяжную вентиляционную шахту. Схема рекуперации позволяет обеспечивать норму концентрации CO₂ в воздухе тоннеля и круглогодично подавать расчетное количество свежего приточного воздуха в тоннель, не опасаясь отрицательных или чрезмерно высоких температур.

Результаты численных экспериментов показывают, что применение теплонасосных систем теплоснабжения по рассмотренной схеме обеспечивает термостатирование параметров микроклимата на уровне, практически исключая изменение теплового режима окружающего подземные сооружения грунтового массива под действием многолетней эксплуатации метрополитена. При этом по сравнению с традиционными технологиями нагрева и охлаждения приточного воздуха обеспечиваются 72%-ная экономия энергии в отопительный период и 15%-ная экономия энергии в период охлаждения (кондиционирования). Сроки окупаемости дополнительных капитальных вложений, в зависимости от темпов ежегодного роста тарифов, составляют от 5 до 14 лет. Здесь важно отметить, что удельный вес удорожания строительства в общем объеме инвестиций составляет менее 0,4%.

Натурная апробация теплонасосной системы теплоснабжения экспериментального станционного комплекса «Саларьево»

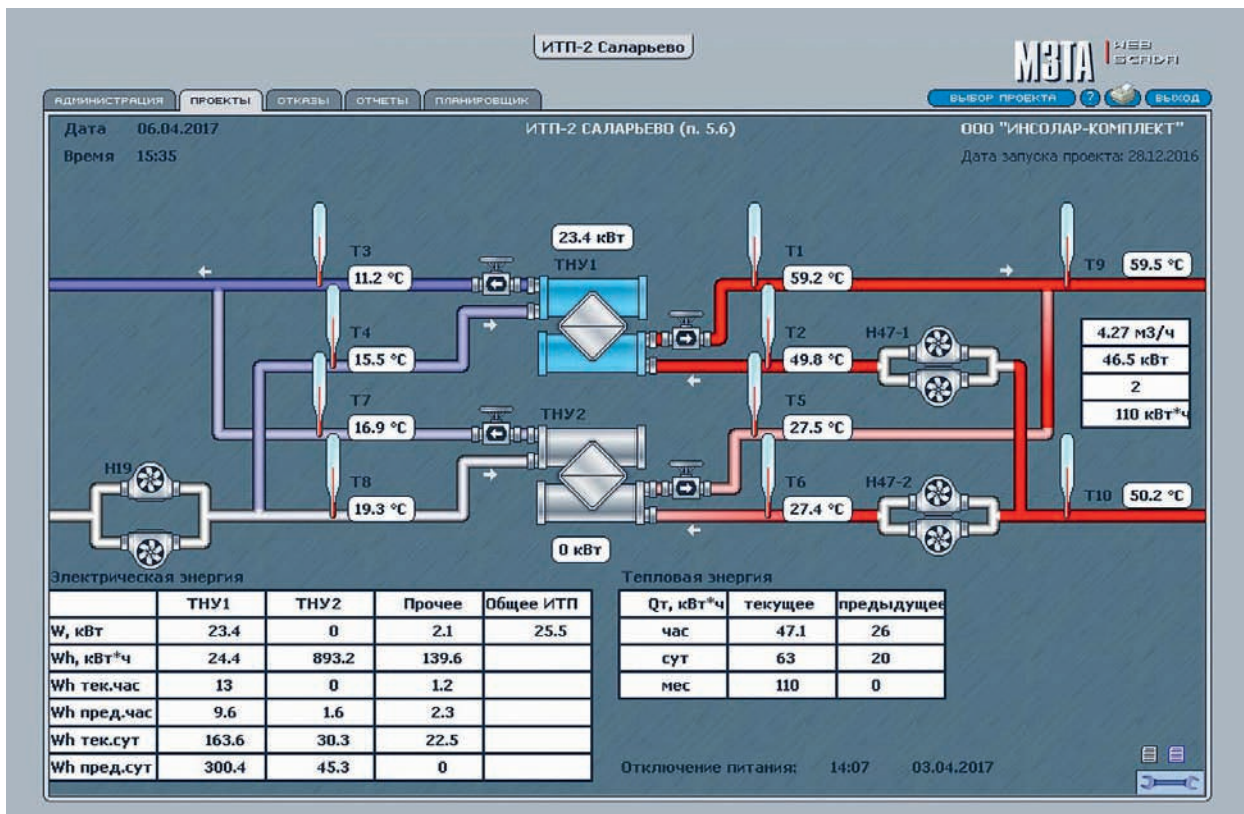
В 2017 году была введена в опытную эксплуатацию первая в России экспериментальная теплонасосная система теплоснабжения (ТСТ) станционного комплекса метрополитена, использующая

низкопотенциальное тепло вентиляционных выбросов. ТСТ была смонтирована АО «МОСИНЖПРОЕКТ» по технологии ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ». Фотография одного из теплонасосных пунктов (ТНП) станции представлена на рис. 6.

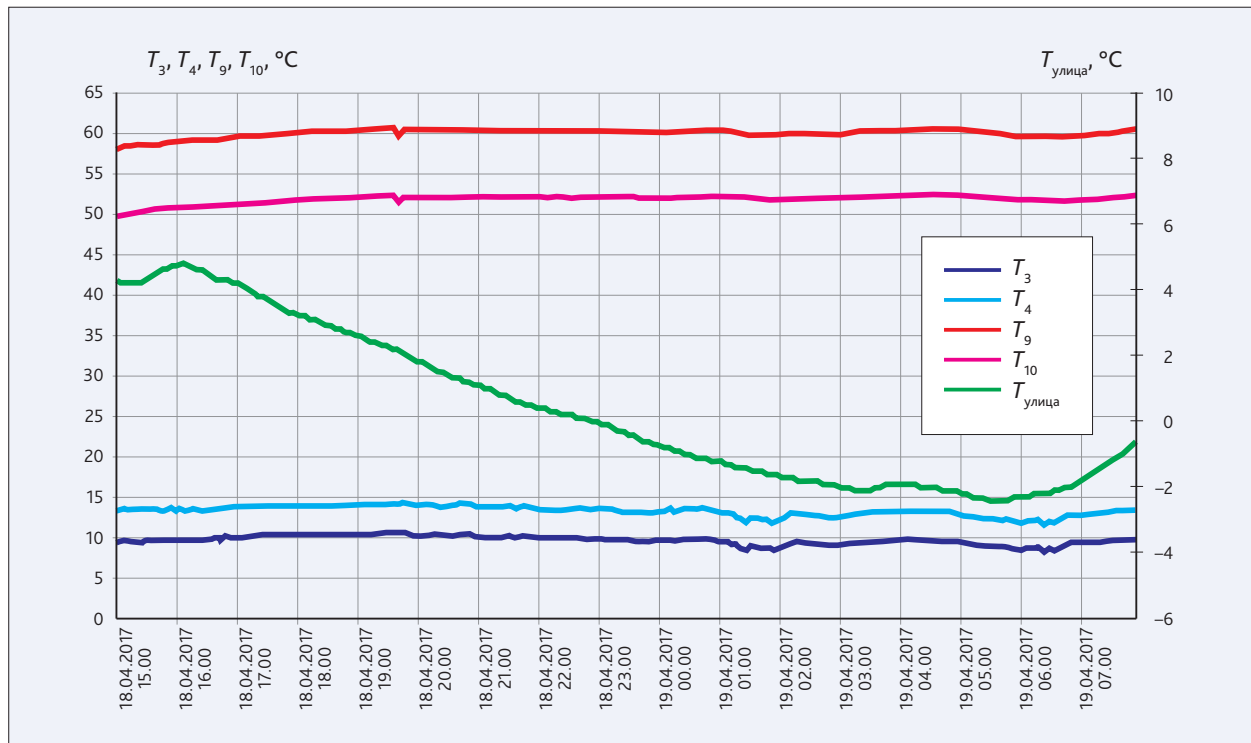
Основные проектные характеристики теплонасосных тепловых пунктов ТНП 1 и ТНП 2 станции «Саларьево» приведены в табл. 2.

При проведении пусконаладочных испытаний ТНП-1 и ТНП-2 были оснащены контрольно-измерительным оборудованием, обеспечивающим проведение полностью автоматизированного круглосуточного мониторинга основных показателей и режимных параметров ТНП в целом и теплонасосного оборудования в частности. Мнемосхема удаленного мониторинга эксплуатационных параметров ТНП-2 станции метро «Саларьево» представлена на рис. 7, а результаты мониторинга в графическом виде – на рис. 8, 9.

Эксплуатационные показатели теплонасосного оборудования при испытаниях, проведенных в апреле 2017 года, представлены в табл. 3. Приведенные натурные данные показывают, что установленная на экспериментальной станции «Саларьево» Московского метрополитена теплонасосная система, утилизирующая теплоту воздуха в тоннеле, на расчетном режиме полностью покрывает тепловую нагрузку системы отопления вестибюлей при обеспечении расчетного уровня температуры подачи теплоносителя в систему отопления на уровне 60 °С. Измеренный коэффициент преобразования энергии в теплонасосном оборудовании составил 2,6. Экономия энергии по сравнению с электрическим нагревом составила 55%. Полезное использование холода, вырабатываемого ТНУ, позволит увеличить коэффициент преобразования энергии в теплонасосном



■ Рис. 7. Мнемосхема удаленного мониторинга ТНП-2 станции метро «Саларьево»



■ Рис. 8. Эксплуатационные показатели теплонасосной установки (температуры): T_9 – температура теплоносителя на подаче в систему отопления, T_{10} – температура теплоносителя из системы отопления, T_4 – температура антифриза из градирни, T_3 – температура антифриза на подаче в градирню

оборудовании до 4,2 и довести экономию энергии до 80%.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили актуальность проблемы повышения энергетической эффективности для Московского метрополитена, для которого сегодня с особой остротой встает вопрос снижения «перегрева» тоннелей и пассажирских пространств в летнее время года. Дисбаланс теплового режима метрополитена приводит к негативному влиянию на тепловой режим тоннелей и станций и накапливающемуся со временем «тепловому загрязнению» грунтовых массивов, окружающих тоннели и объекты метрополитена, которое, в свою очередь, приводит к снижению теплопотерь в грунт и «перегреву» внутреннего воздуха на станциях. Как показали аналитические исследования мирового опыта повышения энергетической эффективности, проблема термостабилизации температурного режима объектов метрополитена сегодня стоит на повестке дня практически всех крупных мегаполисов мира, в том числе Лондона, Парижа, Нью-Йорка и других.

Московский метрополитен сегодня рассеивает в окружающей среде города более 2,2 млрд кВт·ч тепловой энергии в год, которые с успехом могут быть вторично использованы как для покрытия тепловых нагрузок самого метрополитена, так и для теплоснабжения близлежащей застройки.

Анализ публикаций и мирового опыта повышения энергоэффективности метрополитена показывает, что наиболее эффективным решением этих проблем является применение в метро систем теплоснабжения на базе тепловых насосов, утилизирующих в зимнее время избыточное, поступающее сегодня на улицу, тепло вентиляционных выбросов, а в летнее время года реверсируемых в режим охлаждения тоннелей и станционных пространств. Применение тепловых насосов позволит фактически в климатических условиях Москвы создать станции с «нулевым» потреблением тепловой энергии от внешних источников теплоснабжения и полностью отказаться от подключения станций метро к сетям централизованного теплоснабжения и связанных с этим затрат и проблем. Учитывая, что строительство новых линий и объектов метрополитена выходит за МКАД, проблема автономности объектов метро от сетей



РАСШИРЯЕТ СВОЮ ПРОДУКТОВУЮ ЛИНЕЙКУ ОБОРУДОВАНИЕМ CLIMAVENETA

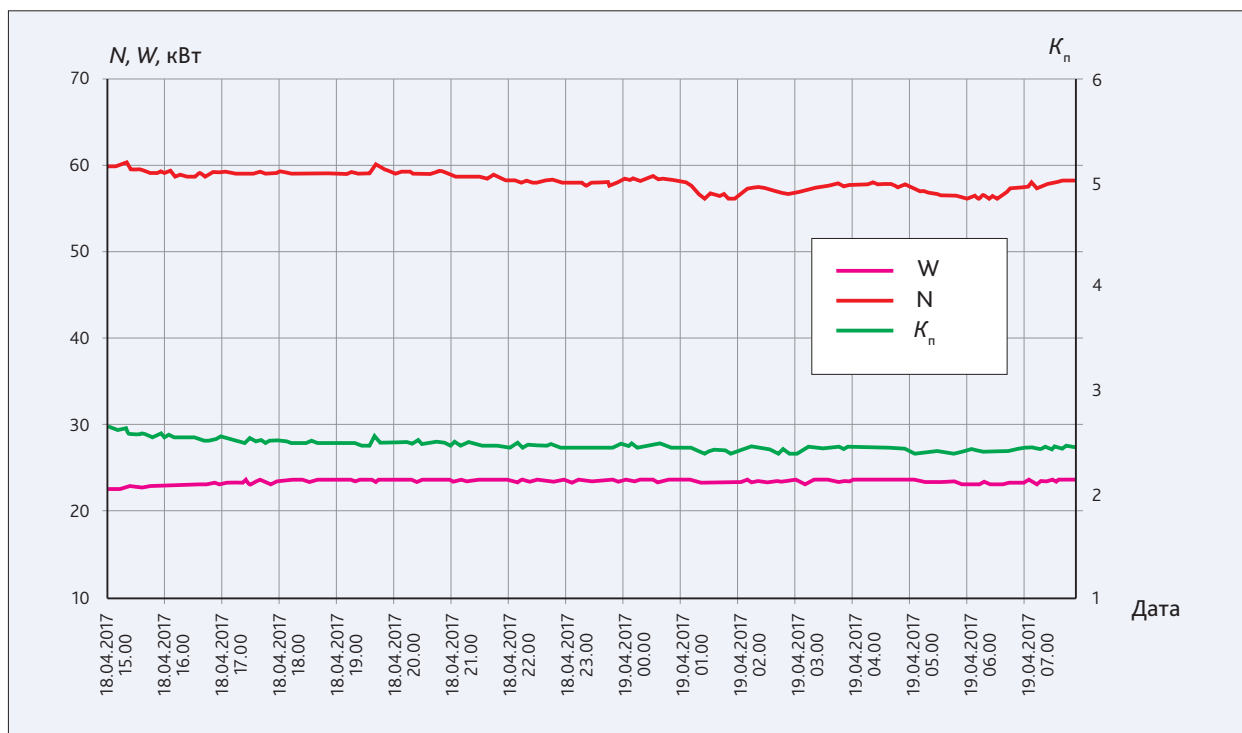


A Group Company of MITSUBISHI ELECTRIC

Climaveneta — европейский лидер в сфере кондиционирования, отопления и вентиляции с 40-летней историей.

С 2015 года компания входит в состав Mitsubishi Electric Corporation

aircon@mer.mee.com



■ Рис. 9. Эксплуатационные показатели теплонасосной установки: W – потребляемая электрическая мощность, N – теплопроизводительность, K_n – коэффициент преобразования энергии

централизованного теплоснабжения становится чрезвычайно актуальной для города Москвы [20].

Весьма дискуссионным является вопрос о комфортных параметрах микроклимата в метрополитене. Большинство исследователей сходятся во мнении, что комфортному тепловому режиму на объектах метрополитена в летнее время года соответствует эффективная температура $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, обеспечивающая равные ощущения теплового комфорта при температуре сухого термометра $23,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 70% , а также при температуре сухого термометра $26,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 30% . Необходимо отметить, что эти цифры получены для американских условий, но, по мнению авторов настоящей статьи, могут быть применимы и для Московского метрополитена. Важным дополнением к комфортным условиям является подвижность внутреннего воздуха на станциях и в поездах, которая должна находиться в диапазоне $0,05\text{--}0,15\text{ м/с}$.

Для приемлемого качества воздуха в вагоне поезда, по мнению большинства исследователей, концентрация углекислого газа должна быть не выше $0,1\%$. Согласно стандартам ASHRAE 62–1989 интенсивность подачи приточного воздуха должна составлять $8,0\text{ л/с}$ ($28,8\text{ м}^3/\text{ч}$) на человека.

Эти объемы воздуха рекомендуются для вагонов, платформ и станционных пространств.

Исследования микроклимата на станциях Московского метрополитена выявили следующее:

- температурный режим в значительной мере зависит от температуры наружного атмосферного воздуха. На этом принципе построены современные графики и режимы работы тоннельной и станционной вентиляции. Станции мелкого заложения более подвержены воздействию атмосферного воздуха, чем станции глубокого заложения, причем сезонные колебания метеофакторов на последних станциях имеют меньшую амплитуду. Относительная влажность воздуха станций также зависит от влажности атмосферного воздуха. Ее наивысшие показатели отмечены на протяжении всех сезонов года на станциях с неблагоприятной гидрогеологической обстановкой ($64,4 + 1,6\%$);
- температура воздуха выше на станциях с большим сроком эксплуатации (50 лет) по сравнению со станциями, построенными 10 лет назад, что свидетельствует о постепенном накоплении тепла стенами тоннеля и притоннельным грунтом, а также недостаточным их охлаждением

Таблица 3

**Эксплуатационные показатели теплонасосного оборудования ТНП станции «Саларьево»
при температуре теплоносителя на входе в систему отопления 60 °С**

№	Наименование параметра	Величина
1	Измеренная теплопроизводительность теплонасосных установок, кВт	122
2	Измеренная потребляемая электрическая мощность теплонасосных установок, кВт	47,9
3	Холодопроизводительность теплонасосных установок, кВт	74,1
4	Коэффициент преобразования энергии теплонасосных установок, ед.	2,6
5	Интегральный коэффициент преобразования энергии теплонасосных установок с учетом выработки тепла и холода, ед.	4,2

в холодный период года. Относительная влажность имеет обратную тенденцию;

- исследования станций с различным пассажиропотоком показали, что на наиболее напряженных станциях (более 200 тыс. человек в сутки) температура во все сезоны была выше, чем на остальных станциях;
- скорость движения воздуха имеет пульсирующий характер и зависит от скорости движения поездов на подходе и уходе со станции. При снижении скорости поезда до 20–25 км/ч за 60–70 м до станции практически отсутствовали резкие колебания скорости движения воздуха.

Анализ опубликованных результатов измерений температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха в московском метро показал, что в 2008–2009 годах они в 14–15 % случаев не отвечали требованиям санитарных правил, а в 2010 г. доля подобных случаев выросла почти в два раза. По-видимому, этот рост связан с неблагоприятными климатическими условиями в Москве (лето 2010 года).

Исследования подтверждают существенную зависимость параметров внутреннего микроклимата объектов Московского метрополитена от изменения параметров наружного атмосферного воздуха. Особенно это проявляется на станциях и в тоннелях мелкого заложения. При снижении температуры наружного (атмосферного) воздуха на 9–10 °С температура на станциях мелкого заложения снижается на 5–6 °С, а на станциях глубокого заложения всего на 0,5–1 °С. При повышении температуры наружного (атмосферного) воздуха на 9–10 °С температура на станциях мелкого заложения повышается на 5–6 °С, а на станциях глубокого заложения – на 1–2 °С. На протяжении всего года на станциях и в тоннелях Московского метрополитена температура воздуха выше температуры атмосферного воздуха (кроме жаркого периода года)

и составляет 24–25 °С – для мелкого и 26–27 °С – для станций глубокого заложения. На станциях мелкого заложения температурный перепад в течение года составляет до 15 °С, а для глубокого заложения – до 5 °С. Существует еще одна особенность: на станциях с более длительным сроком эксплуатации температура снижается по отношению к атмосферному воздуху меньше и медленнее, а влажность – наоборот.

В меньшей мере перепады температуры и влажности воздуха зависят от типа используемой вентиляции (подавляющее количество станций оборудовано реверсивной схемой вентиляции). Значительное влияние на температурный режим оказывают подвижной состав (до 2/3 внутреннего тепла), пассажиропоток (до 1/3 внутреннего тепла), осветительные приборы и техническое оборудование (эскалаторы).

Влажность на станциях обуславливается: влажностью наружного воздуха, состоянием грунтовых вод, проникающих в тоннели, влагой от мытья станций и тоннелей, испарениями от пассажиров, работой систем водоотведения и канализации.

Скорость движения воздуха на рабочих местах подземных сооружений метрополитена определяется прежде всего мощностью вентиляции, а на станциях – поршневым эффектом при движении поездов. Неблагоприятным с гигиенической точки зрения является эффект «поршня», возникающий при значительном воздухообмене во время движения поездов, который сопровождается резким изменением воздушных потоков. Исследования показывают, что наиболее высокие скорости движения воздуха возникают на рабочих местах дежурных по станции, расположенных на платформах (до 2–6 м/с). Поршневой эффект повышает давление перед поездом, выталкивающим воздух перед собой, в то время как позади поезда образуется зона низкого давления. Когда

поезд въезжает в тоннель, он вызывает ускорение воздуха в тоннеле до скорости 3–8 м/с. Как следствие, шахта вентиляции в центральной части тоннеля выбрасывает воздух по мере приближения к ней поезда и всасывает воздух по мере его удаления.

Мгновенное увеличение потока воздуха, вызванное поршневым эффектом, может достигать 50%. Чтобы извлечь выгоду из давления, вызванного поршневым эффектом, вентиляция должна управляться так, чтобы вызванный поездом поток воздуха был поддержан механической вентиляцией. Это потребует учета в алгоритме работы вентиляции положения поезда и направления его движения. Пассивные шахты посреди тоннелей являются самыми эффективными для использования поршневого эффекта при воздухообмене тоннеля с внешней средой.

Результаты проанализированных исследований показывают, что снижение скорости поезда ведет к уменьшению его кинетической энергии и энергии, выделяющейся при торможении, что, в свою очередь, способствует снижению температуры в тоннеле и вагонах поезда. Снижение скорости поезда с 17,5 до 12 м/с (приблизительно 31%-ное сокращение) уменьшает температуру в тоннеле и вагонах приблизительно на 2 °С. В часы пик для высокой плотности движения поездов снижение скорости представляется проблематичным, тогда как во внепиковое время этот прием можно было бы использовать. Кроме того, к положительным результатам приводит снижение веса вагона поезда, которое влечет уменьшение его кинетической энергии и энергии, выделяемой при торможении. В то же время влияние снижения веса вагона на температуру воздуха в тоннеле и вагоне не столь существенно, как влияние уменьшения скорости движения поезда.

Регенеративное торможение позволяет полезно использовать (регенерировать) часть энергии, выделяющейся при торможении поезда, для генерации электрической энергии, предотвращая ее преобразование в тепловую энергию.

Важным направлением исследований во всем мире является поиск эффективных способов охлаждения тоннелей и станций метрополитена, среди которых наиболее эффективным является применение тепловых насосов. Частным случаем подобной системы охлаждения является ее дополнение охлаждением воздуха в тоннеле с помощью «пассивного» холода грунтовых вод.

Грунтовая вода в Москве имеет температуру около 8 °С. Она может быть получена от водоотливных установок метрополитена или из устроенных рядом с метрополитеном буровых скважин. Важным преимуществом этой схемы является возможность снижения уровня грунтовых вод в городе, который в последние годы повышается. После охлаждения метрополитена грунтовая вода может быть направлена в испарители тепловых насосов, охлаждена до температуры 6 °С и безопасно сброшена в реку Москву, уменьшив ее тепловое загрязнение.

Важно отметить еще одно направление применения теплонасосных технологий на объектах Московского метрополитена: это направление связано с утилизацией «сбросного» низкопотенциального тепла эксплуатируемых тоннельных и станционных систем вентиляции. Как уже отмечалось, 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 использовать 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 рублей, не считая ежегодного дохода от продажи тепловой энергии.

Литература

17. Васильев Г. П., Горнов В. Ф., Колесова М. В. и др. Техничко-экономические аспекты применения теплонасосного оборудования на объектах метрополитена // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 6. – С. 16–20.
18. Vasilyev G. P., Peskov N. V., Gornov V. F. et al. The influence of subway's underground facilities operation on the natural thermal conditions of adjacent soil // Appl. Mech. Mat. – 2014. – Т. 664. – С. 250–253.
19. Васильев Г. П., Тимофеев Н. А. Энергетический потенциал вентиляционных выбросов жилых зданий в Москве // АВОК. – 2010. – № 1. – С. 24–32.
20. Васильев Г. П. Градостроительная политика Москвы в области энергосбережения Инженерные системы // АВОК Северо-Запад. – 2014. – № 2. – С. 32–33. ■