

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

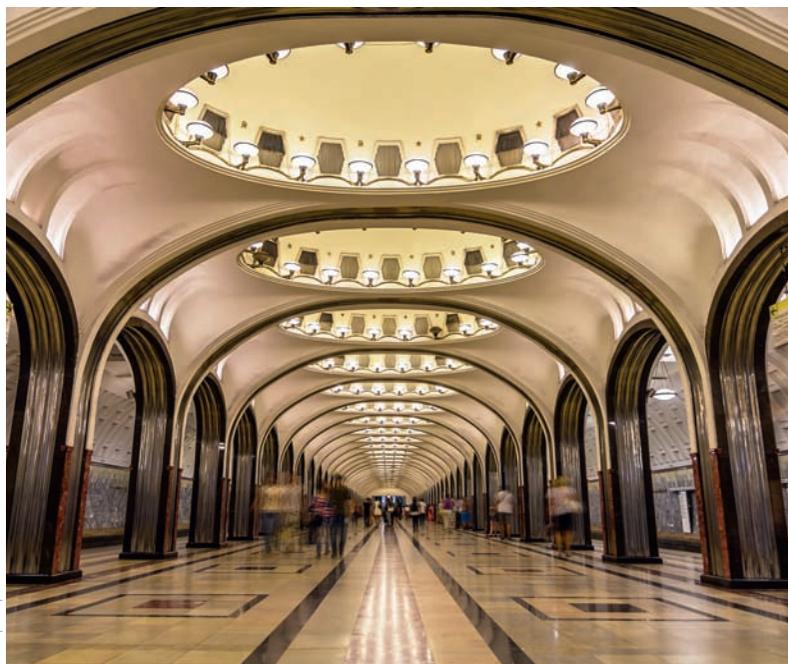
Статья содержит результаты исследований, выполненных при финансовом участии Департамента градостроительной политики города Москвы и посвященных повышению энергетической эффективности объектов Московского метрополитена. В статье представлено обоснование возможности и экономической целесообразности создания объектов метрополитена с «нулевым» потреблением тепловой энергии от внешних источников теплоснабжения и оснащенных теплонасосными системами теплохладоснабжения, обеспечивающими термостабилизацию и повышение комфортности внутреннего микроклимата на станциях и в вестибюлях метро. Предлагаемая в статье технология не только обеспечивает до 80% экономии энергии, но и при существующих ценах на подключение к централизованным сетям теплоснабжения в большинстве случаев окупается уже на стадии строительства. Важным преимуществом технологий жизнеобеспечения, использующих тепловые насосы, является предоставляемая ими возможность стабилизации теплового режима и параметров внутреннего микроклимата на станциях и в вестибюлях метрополитена. Предложенные схемы применения теплонасосного оборудования позволяют его реверсировать в режим холодоснабжения, в котором в полном объеме обеспечиваются кондиционирование и контроль относительной влажности внутреннего воздуха в пассажирских и служебных помещениях станций и вестибюлей.

Введение

Проблема повышения комфортности теплового режима объектов метрополитена становится все более острой практически для всех крупных городов и мегаполисов. С ростом населения в крупных городах, соответственно, увеличиваются пассажиропотоки и нагрузки на инженерные системы метрополитена. Сегодня при эксплуатации подземных сооружений генерируется столько тепловой энергии, что ее достаточно, чтобы поднять температуру воздуха в тоннелях на 8–11 °С выше температуры окружающей среды [1]. Так, например, в Лондоне, где температура окружающей среды летом может достигать 30 °С и более, в поездах метрополитена зарегистрирована температура более 37 °С [2]. Очевидно, что комфорт для пассажиров в таких условиях обеспечить трудно.

Метрополитен сегодня является крупнейшим источником вторичных энергоресурсов на территории Москвы. Годовой расход электрической энергии на работу метрополитена составляет около 2 млрд кВт·ч. Кроме этого, с вытяжным воздухом удаляются и тепловыделения от пассажиров, ежегодный объем которых может быть оценен примерно в 0,15–0,17 млрд кВт·ч. Таким образом, Московский метрополитен ежегодно выбрасывает в окружающую среду около **2,2 млрд кВт·ч низкопотенциальной тепловой энергии**. Очевидно, что при вторичном использовании этого количества энергии **достаточно для покрытия в полном объеме всех собственных потребностей метрополитена в тепловой энергии**. Для иллюстрации масштабов рассеиваемого сегодня в атмосфере города «сброшенного» тепла метрополитена можно привести тот факт, что при его рациональном вторичном использовании можно практически полностью покрыть затраты на отопление и вентиляцию жилых домов площадью около 40 млн м².

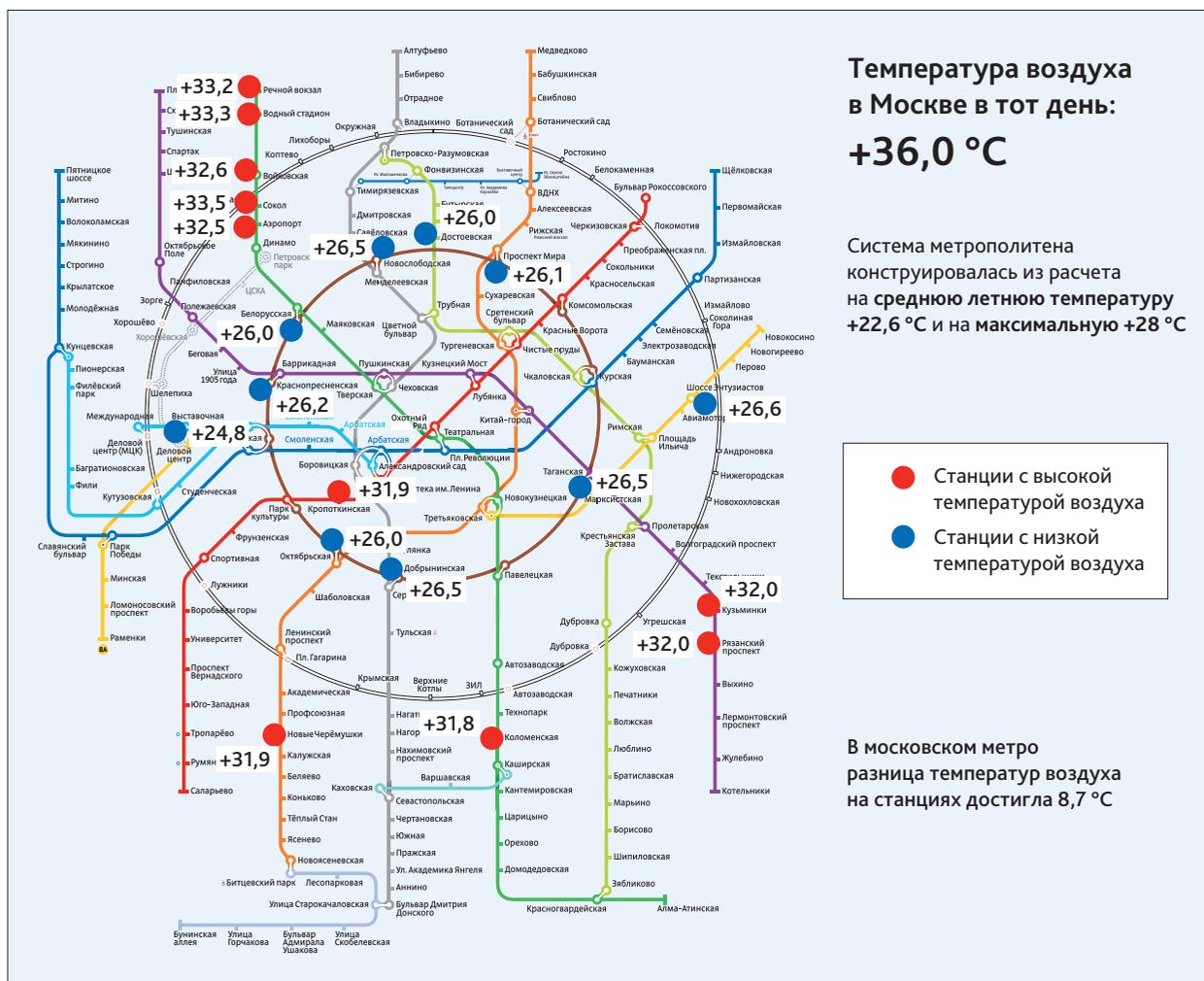
Важным аспектом проблемы повышения энергетической эффективности метрополитена является необходимость снижения «теплового загрязнения» городской среды. Уже сегодня температура воздуха в городе в жаркие дни на 3–5 °С превышает температуру воздуха в области, и заметный вклад в этот процесс вносит тепловое влияние метрополитена. Накапливающееся со временем тепловое «загрязнение» грунтовых массивов, окружающих тоннели метрополитена, не только создает определенные экологические проблемы, но и негативно влияет на тепловой режим тоннелей и станций. Если не предпринимать никаких действий, то в ближайшем



будущем мы будем вынуждены удалять теплоизбытки только с помощью систем кондиционирования.

Параметры микроклимата пассажирских помещений Московского метрополитена обеспечиваются системой тоннельной вентиляции, которая спроектирована на основании действующего СП 120.13330.2012 «Метрополитены. Актуализированная редакция СНиП 32–02–2003». На основании положений этого нормативного документа тоннельная вентиляция спроектирована без устройств подогрева или охлаждения и подает в метрополитен воздух с наружными параметрами. При этом для подогрева воздуха в холодный период и охлаждения его в теплый используются теплоаккумулирующие свойства массива грунта в заобделочном пространстве тоннелей. Согласно упомянутому СП расчетная температура наружного воздуха в летний период для проектирования вентиляции Московского метрополитена составляет 22,6 °С. При температурах наружного воздуха выше этой величины тоннельная вентиляция работает в нерасчетном режиме, поскольку система тоннельной вентиляции не имеет устройств охлаждения воздуха для работы в период высоких температур и температурный режим на станциях метрополитена напрямую зависит от температуры наружного воздуха, подаваемого с поверхности тоннельной вентиляцией.

В период высоких температур приходится прибегать к снижению объемов подачи наружного воздуха в дневное время во избежание перегрева



■ Рис. 1. Температуры внутреннего воздуха на станциях Московского метрополитена, наблюдавшиеся 28 июля 2010 года

станций и интенсивно вентилировать в ночное время, когда на поверхности относительно прохладно. Но как показывает практика, этих мероприятий недостаточно [3, 4]. Ситуация к тому же усугубляется наблюдающимся «потеплением климата» и увеличивающимся из года в год пассажиропотоком, которые вносят свой негативный вклад в дисбаланс теплового режима метрополитена. Как уже отмечалось, сегодня Московский метрополитен ежегодно расходует около 2 млрд кВт·ч. Кроме этого, важной составляющей теплового баланса метрополитена являются тепловыделения от пассажиров. Вся эта энергия в конечном счете преобразуется в тепловую и рассеивается в окружающей среде: нагревает грунт, окружающий тоннели и станции метрополитена, и выбрасывается в атмосферу с вытяжным воздухом системы вентиляции. При этом нарушение теплового баланса метрополитена приводит к негативному влиянию на тепловой режим

тоннелей и станций и к 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. Для иллюстрации этой ситуации на рис. 1 приведены температуры внутреннего воздуха на станциях Московского метрополитена, наблюдавшиеся 28 июля 2010 года при температуре наружного воздуха +36 °C.

Тепловой комфорт пассажиров

Среди публикаций, посвященных тепловому комфорту пассажиров в метрополитене, можно выделить четыре главные: публикации Паркера [5], Белла и Уотса [6], отчет 70180/1 [7] BSRIA и публикацию Окленда [8].

Паркер [5] представил результаты исследований, выполненных для американских условий. По Паркеру комфортному тепловому режиму соответствует эффективная температура 21,8 °С, обеспечивающая равные чувства теплового комфорта при температуре сухого термометра 23,3 °С и относительной влажности воздуха 70 %, а также при температуре сухого термометра 26,2 °С и 30 %-ной относительной влажности. Необходимо отметить, что результаты этого исследования справедливы для американских условий, для других стран оптимальные параметры комфортного режима могут меняться.

Исследования Белла и Уотса [6] дополнили исследования Паркера и уточнили пределы комфортного изменения подвижности воздуха, которые, по их мнению, должны находиться в диапазоне 0,05–0,15 м/с.

Отчет [7] BSRIA – результат проекта, начатого Департаментом по проблемам окружающей среды, транспорта и регионов (DETR) Великобритании, направленного на изучение качества окружающей среды в зданиях общественного транспорта. Отчет касается шести отдельных зданий общественного транспорта Великобритании. Они включают: две станции железнодорожных магистралей (одна из которых была защищенной станцией), один аэропорт, одна гавань и две станции метро Лондонского метрополитена. Только часть отчета [7] BSRIA касается двух станций метро Лондонского метрополитена: одна из них современная подземная станция метро (MUTS), а вторая – старая станция глубокого заложения (OUTS). Тепловой режим станций изучался в течение летних месяцев 2000 г. Для обеих станций исследование теплового режима проводилось возле касс и на платформе. Основной вид деятельности, вовлеченный в методологию исследования, состоял в том, что в целевой области подземной станции метро интервьюер задавал представителю обществу серию вопросов относительно окружающей среды, а инженер BSRIA одновременно проводил физические измерения с тепловым оборудованием – анализатором комфорта.

Проведенные измерения показывали, что для MUTS было некоторое изменение скорости движения воздуха в течение периода исследований. Наблюдалось некоторые пики скорости воздуха, и диапазон ее изменения находился между 0,1 и 0,5 м/с. Приблизительно 40 % времени скорость воздуха была ниже 0,2 м/с, в 98 % – ниже 0,35 м/с и приблизительно в 5 % – ниже 0,1 м/с. Для OUTS было также

— **Холодильные машины**
для систем кондиционирования и технологического охлаждения

- с воздушным охлаждением, 5–1800 кВт
- free cooling, 41–1700 кВт
- с водяным охлаждением, 87–2400 кВт

— **Тепловые насосы**

- воздух – вода, 4–1160 кВт
- вода – вода, 5–2400 кВт

— **Системы нагрева и охлаждения воды**

Решения для одновременного производства холодной и горячей воды, 33–850 кВт

— **Крышные кондиционеры**

23–468 кВт

— **Прецизионные кондиционеры**

- с непосредственным охлаждением и на охлаждающей воде
- охлаждающие блоки со стеллажами
- охлаждающие дверные блоки
- моноблочные системы для внутренней и наружной установки

JAPAN

Реклама



CLIMVENETA
SUSTAINABLE COMFORT

A Group Company of

 **MITSUBISHI
ELECTRIC**

aircon@mer.mee.com

Таблица 1.

Результаты измерений параметров микроклимата на станциях метрополитена за период с 20.06 по 20.07. 2017 г.

№ п/п	Название станции	Год постройки	Глубина заложения, м	Температура на улице, °С, Макс.	Температура на станции, °С, Макс.	Относительная влажность воздуха, %, Макс.	CO ₂ , ppm
1	2	4	5	7	12	15	16
1	«Кропоткинская»	1935	13	26,9	28,3	55	580
2	«Охотный ряд»	1935	15	26,9	28,5	60	750
3	«Тверская»	1979	42	26,9	29,6	56	710
4	«Сокол»	1938	9,6	27,5	28,8	63	790
5	«Новокузнецкая»	1943	37,5	26,9	28,0	62	660
6	«Аэропорт»	1938	10	27,5	28,5	63	600
7	«Коломенская»	1969	9	26,9	29,3	74	600
8	«Пушкинская»	1975	51	26,9	29,4	58	680
9	«Кузьминки»	1966	8	26,9	29,8	64	660
10	«Белорусская»	1952	42,5	26,9	26,3	66	Н/д
11	«Новослободская»	1952	40	26,9	27,3	65	Н/д
12	«Таганская»	1966	36	26,9	25,4	67	Н/д
13	«Киевская» (кольцевая)	1954	48	24,9	26,6	65	Н/д
14	«Добрынинская»	1950	35,5	26,9	26,5	63	Н/д
15	«Ленинский проспект»	1962	16	24,9	28,5	59	560
16	«Чеховская»	1987	62	27,8	29,5	62	Н/д
17	«Выставочная»	2005	25	26,0	24,0	69	Н/д
18	«Киевская» (Филевская линия)	1937	8,7	27,8	28,4	60	Н/д
19	«Киевская» (Арбатско-Покровская линия)	1953	38	26,9	24,9	65	Н/д
20	«Площадь Революции»	1938	33,6	26,9	27,0	69	Н/д
21	«Парк Победы»	2003	73,6	27,5	25,3	72	590
22	«Октябрьская»	1950	40	24,5	25,7	54	Н/д
23	«Арбатская»	1953	41	24,7	27,6	54	Н/д
24	«Проспект Мира»	1952	40	22,9	24,8	54	Н/д
25	«ВДНХ»	1958	53,5	22,9	26,8	56	Н/д
26	«Преображенская площадь»	1965	8	24,7	27,0	46	Н/д
27	«Пионерская»	1961	0	24,5	29,0	49	Н/д

некоторое изменение воздушной скорости, измененной во время контроля. Наблюдались пики в течение этого времени в диапазоне от 0,1 до 0,5 м/с. Скорость воздуха была ниже 0,2 м/с в течение эксперимента приблизительно в 10 % времени, но ниже 0,35 м/с в течение приблизительно 98 % времени.

Для MUTS 96% пассажиров нашли, что температура была подходящей, а для остальных 4 % было

слишком тепло. Для 63 % пассажиров OUTFS было слишком тепло, а 36% отметили условия приемлемыми. Для MUTS 91 % пользователей воспринимал уровни влажности приемлемыми, для 5 % пассажиров было очень сухо, а для 4 % было слишком влажно. При сравнении всего 40% пользователей OUTFS нашли, что уровни влажности были подходящими, 51 % назвали слишком влажными, остальные 9% – слишком сухими.

В целом ожидаемые значения теплового самочувствия пассажиров соответствовали их реальным ощущениям. В случаях, когда окружающая среда для пассажиров была слишком теплой, PMV* предсказал, что люди будут чувствовать себя теплее, а в случаях, когда окружающая среда была слишком прохладна, предсказание соответствовало этому вполне удачно.

В дополнение Лондонский метрополитен выполнил исследование теплового комфорта в поездах [8]. Исследования показали, что, кроме очевидного фактора – температуры, есть несколько дополнительных факторов, которые определяют тепловой комфорт пассажиров поезда. Прежде всего это относительная влажность воздуха. Низкая влажность воздуха (ниже приблизительно 30%-й относительной влажности) будет сушить слизистую оболочку носа, глаза и горло, а также позволять пыли циркулировать. Пыль в воздухе может привести к проблемам с горлом/грудной клеткой, к воспалению глаз, носа и т.д. Высокая влажность ощущается как более теплый воздух и заставляет людей потеть.

Также очень важно качество воздуха в вагонах. Желательно не иметь в вагоне открытых окон, а оснащать их системой вентиляции: в открытые окна попадают пыль, твердые примеси, теплый воздух из тоннелей.

Плотность числа пассажиров в вагоне поезда может изменяться значительно. Средства управления тепловыми условиями и условиями качества воздуха вагона должны быть в состоянии приспособиться к этим изменениям. Исследование показало, что самыми чувствительными для пассажиров являются теплые потолки. Поезда имеют низкие металлические крыши, и пассажиры должны стоять в течение значительных отрезков времени, ощущая неудобство от теплых потолков.

В работах Чоу [9, 10] были исследованы критерии вентиляции, обеспечивающей низкое содержание в воздухе диоксида углерода в поездах метрополитена Гонконга. Для приемлемого качества воздуха в вагоне поезда, по мнению исследователей, концентрация углекислого газа должна быть не выше 0,1%. Согласно стандартам ASHRAE 62-1989 на вентиляцию по приемлемому качеству воздуха в помещении [11, 12] интенсивность подачи приточного воздуха должна составлять 8,0 л/с (28,8 м³/ч) на

* Индекс комфортности (Predicted Mean Vote – PMV), предложенный О. Фангером.



Реклама

 **Testo**
1957-2017

Оптимальный выбор для любой задачи

Новые тепловизоры testo 865/868/871/872 обладают лучшим качеством изображения в своем классе и значительно облегчают диагностику зданий и систем.

- Интеллектуальные приборы с Bluetooth и WiFi
- Разрешение до 640x480 пк с технологией SuperResolution
- Объективное сравнение термограмм и автоматическое определение коэффициента излучения с функциями testo ScaleAssist и ε-Assist



человека. Эти объемы воздуха рекомендуются для вагонов, платформ и станционных пространств. Необходимый объем приточной вентиляции на человека V_p может быть определен исходя из отношения уровня углекислого газа в вагоне к внешнему атмосферному уровню концентрации.

Выполненный авторами данной статьи анализ опубликованных результатов исследований, посвященных тепловому комфорту микроклимата объектов Московского метрополитена, показал, что в качестве приемлемых предельных параметров теплового комфорта микроклимата в летнее время в метро можно ориентироваться на температуру сухого термометра $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительную влажность воздуха 70% и скорость движения воздуха $0,15\text{ м/с}$.

В летний период (с 20 июня по 20 июля 2017 г.) авторами настоящей статьи были проведены натурные исследования параметров внутреннего микроклимата на 27 станциях Московского метрополитена.

Замеры параметров микроклимата – температуры и влажности – производились при температуре наружного воздуха от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. На каждой станции были произведены замеры как минимум за три дня в течение двух летних месяцев с разным температурным режимом наружного воздуха: I – до $23\text{ }^{\circ}\text{C}$,

II – от 23 до $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, III – выше $26\text{ }^{\circ}\text{C}$, в разное время суток: утром (с 8 до 12 ч), днем (с 12 до 18 ч), вечером (с 18 до 22 ч).

Измерения проводились с помощью гигрохронov iButton DS1923-F5, фиксирующих температуру и влажность с частотой две минуты. Гигрохроны закреплялись на сумке участника эксперимента, исключая контакт с телом человека. Участник эксперимента находился на каждой станции не менее 15 минут, осуществляя круговой обход станции вдоль левой и правой платформ и по всей длине зала станции (левая и правая платформы определяются произвольно).

Обследуемые станции были подобраны по следующим критериям:

- повышенный температурный режим в предыдущие годы,
- ранжирование по глубине залегания (не менее двух станций в каждом ранге),
- присутствие в списке кольцевых, радиальных и пересадочных станций.

Список станций с указанием года постройки и глубины заложения, на которых проводились измерения, и результаты измерений приведены в табл. 1. На платформе станций измерялись следующие параметры микроклимата:

- температура воздуха,
- относительная влажность воздуха,
- уровень содержания CO₂.

На каждой станции проводилось около 10 измерений.

Для каждой станции рассчитывались следующие значения:

- средняя и максимальная температура наружного воздуха за период измерения;
- средняя температура воздуха на станции для периодов: утро, день, вечер и сутки;
- максимальная температура воздуха на станции;
- температура на станции, приведенная к базовым значениям наружной температуры;
- среднее и максимальное значения относительной влажности воздуха на станции;
- среднее значение содержания CO₂ в воздухе станции.

Анализ данных из табл. 1 позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение температуры на станции по времени суток имеет в среднем тенденцию к росту от утра к вечеру, хотя можно выделить три типовых графика суточного изменения температуры на станции, которые будут рассмотрены ниже.

2. Средняя температура на станциях метро (из выборки) составила 26,3 °С при средней дневной температуре 24,2 °С, т. е. превышает наружную температуру воздуха примерно на 9 %.

3. Превышение максимально допустимой температуры отмечено примерно на 45 % станций (из выборки).

4. Относительная влажность воздуха превышает комфортные условия (40–60 %), но находится в допустимых пределах и не превышает 74 % (предельное допустимое значение 75 %).

5. Содержание CO₂ превышает комфортные значения.

Аналогичные исследования параметров микроклимата в вагонах поездов метрополитена, проведенные в тот же период, показали:

- средняя температура в вагонах метро (из выборки) составила 27,5 °С при средней дневной температуре 24,5 °С, т. е. превышает наружную температуру воздуха примерно на 12 % и выше средней температуры на станциях примерно на 5 %;
- среднее содержание CO₂ в вагонах метро выше, чем на станциях, примерно на 30 % и составляет около 840 ppm. Максимальное зарегистрированное значение составило 1100 ppm.

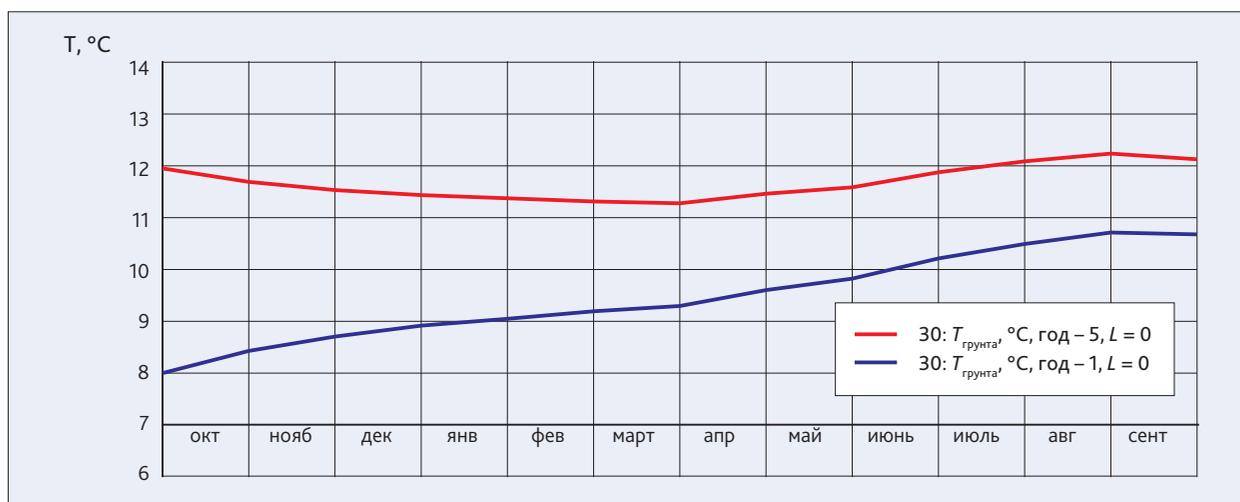
При этом необходимо отметить, что внешние климатические условия во время проведения измерений были далеки от экстремальных.

Особенности теплового режима грунта, окружающего подземные сооружения метрополитена

Рассмотрим основные физические процессы, протекающие в грунтовом массиве, окружающем тоннели и станции метрополитена в период их эксплуатации, и оказывающие существенное влияние на формирование их теплового режима.

Грунтовый массив, окружающий подземное сооружение, независимо от того, в каком состоянии он находится (в мерзлом или талом), представляет собой сложную трехфазную полидисперсную гетерогенную систему, скелет которой образован огромным количеством твердых частиц разнообразных формы и величины и может быть как жестким, так и подвижным в зависимости от того, прочно ли связаны между собой частицы или же они отделены друг от друга веществом в подвижной фазе. Промежутки между твердыми частицами могут быть заполнены минерализованной влагой, газом, паром и льдом или тем и другим одновременно. Моделирование процессов тепломассопереноса, формирующих тепловой режим такой многокомпонентной системы, представляет собой чрезвычайно сложную задачу, поскольку требует учета и математического описания разнообразных механизмов их осуществления: теплопроводности в отдельной частице, теплопередачи от одной частицы к другой при их контакте, молекулярной теплопроводности в среде, заполняющей промежутки между частицами, конвекции пара и влаги, содержащихся в поровом пространстве, и многих других.

Среди факторов, существенно влияющих на формирование теплового режима грунтового массива и обуславливающих его особенности как объекта моделирования, следует особо выделить тепловое воздействие подземного сооружения, вызываемое эксплуатационными нагрузками объекта метрополитена. В процессе эксплуатации «сброс» тепловой энергии в грунтовый массив может вызвать значительные изменения хода его (грунта) температур в годовом цикле по сравнению с аналогичным массивом ненарушенного грунта в естественном состоянии и приводит, как правило, к сложной конфигурации изотермических



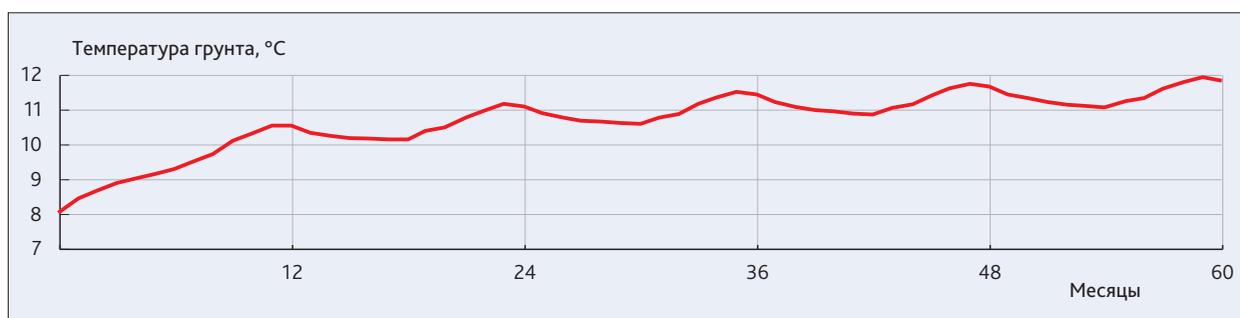
■ Рис. 2. Температура грунта на контакте с тоннелем в первый (синий график) и пятый (красный график) годы эксплуатации

поверхностей в грунте. Этот момент осложняется еще и тем обстоятельством, что градиенты температуры в толще массива хотя и невелики, но соизмеримы во всех направлениях, что, в свою очередь, заставляет отказаться от использования линейных или плоских моделей теплового режима и приводит к необходимости построения сложной пространственной математической модели, учитывающей процессы изменения температурных полей по всем трем координатным осям.

К характерным особенностям теплового режима систем теплосбора как объекта моделирования также следует отнести и так называемую «информативную неопределенность» математических моделей [11], описывающих подобные процессы, или, иначе говоря, отсутствие достоверной информации о воздействиях на систему окружающей среды (атмосферы и массива грунта, находящихся вне зоны теплового влияния изучаемого объекта), и чрезвычайную сложность их аппроксимации. Действительно, если аппроксимация воздействий на систему наружного климата хотя и сложна, но все же при определенных затратах «машинного времени» и использовании существующих моделей (например, «типового климатического года») может быть реализована, то проблема учета в модели влияния на систему атмосферных воздействий (роса, туман, дождь, снег и т.д.), а также аппроксимация теплового влияния на грунтовый массив подстилающих и окружающих его слоев грунта на сегодняшний день практически неразрешима и могла бы составить предмет отдельных исследований. Так, например, малая изученность процессов формирования фильтрационных

потоков грунтовых вод, их скоростного режима, а также невозможность получения достоверной информации о тепловлажностном режиме слоев грунта, находящихся ниже зоны теплового влияния изучаемого объекта, значительно осложняют задачу построения корректной математической модели теплового режима грунтового массива, окружающего подземное сооружение.

Перечисленные выше характерные особенности теплового режима грунтовых массивов, окружающих подземные объекты метрополитена, значительно усложняют задачу построения его математических моделей. В связи с этим для достижения возможности построения подобных математических моделей, адекватных реальным физическим процессам, в ОАО «ИНСОЛАР-ИНВЕСТ» был разработан метод математического моделирования теплового режима грунта с источниками/стоками тепла [12–14], позволяющий в определенной мере преодолеть трудности на пути создания корректных моделей теплового режима подземных сооружений метрополитена и использование которого при построении математических моделей теплового режима подземных сооружений позволяет обойти трудности, связанные с аппроксимацией внешних воздействий на систему. Определенным преимуществом метода по сравнению с традиционным подходом к моделированию тепловых процессов, протекающих в подобных системах, является использование в модели экспериментально полученной информации о естественном тепловом режиме грунта, позволяющее частично учесть весь комплекс факторов (таких как наличие грунтовых вод, их скоростной и тепловой режимы, структура



■ Рис. 3. Температура грунта, контактирующего с тоннелем, в первые пять лет эксплуатации

и расположение слоев грунта, «тепловой» фон Земли, атмосферные осадки, фазовые превращения влаги в поровом пространстве и многих других), существеннейшим образом влияющих на формирование теплового режима подземного сооружения, совместный учет которых в строгой постановке задачи на сегодняшний день практически невозможен.

На рис. 2, 3 представлены результаты моделирования теплового режима тоннеля метрополитена при его многолетней эксплуатации в песчаном грунте. Из зависимостей, представленных на рис. 2, 3, видно, что в течение первых лет эксплуатации тепловое влияние тоннеля вызывает активное изменение естественного теплового режима грунта (естественная температура грунта 8 °C), а начиная с пятого года эксплуатации, грунт выходит на «квазиустановившийся» периодический режим, и дальнейшая эксплуатация тоннеля не вызывает существенных его изменений. Это обстоятельство обязательно должно учитываться при проектировании подземных объектов метрополитена [15, 16].

Литература

1. An air conditioning study of the New York City transit system. New York: New York City Transit Authority, 1968. Part I.
2. Evening Standard. West End Final. Tuesday 15 July 2003. London, 2003.
3. Annual Report. TMB, Metro de Barcelona. Barcelona, 2010.
4. Ballesteros-Tajadura R., Santolaria-Morros C., Blanco-Marigorta E. Influence of the slope in the ventilation semi-transversal system of an urban tunnel // Tunnel. Underground Sp. Technol. – 2006. –V. 21 (1). – P. 21–28.
5. Parker J. C. Air-conditioning related to passenger environment, C32/72. Railway Division Conference on Passenger Environment. IMechE, 1972. P. 58–63.
6. Bell C.R., Watts A. J. Thermal limits for industrial workers // Br. J. Ind. Med. – 1971. –V. 28. –P. 259–264.
7. Booth W. B., Galliers S. D. Quality environments for public transport buildings, BSRIA report, DETR ref. no. CI 38/6/160, ref. no. SS70180, 2001.
8. Oakland Innovation and Information Services Ltd., 18 Cambridge Science Park, Milton Road, Cambridge, CB40FH, Thermal comfort on trains. Cambridge, 2002.
9. Chow W. K. Ventilation of enclosed train compartments in Hong Kong // Appl. Energy. – 2002. –V. 71. –P. 161–170.
10. Chow W. K., Yu P. C.H. Simulation on energy use for mechanical ventilation and air conditioning (MVAC) systems in train compartments // Energy. – 2000. –V. 25. –P. 1–13.
11. Ampofo F., Maidment G., Missenden J. Underground railway environment in the UK. Part 2. Investigation of heat load // Appl. Therm. Engineering. – 2004. –V. 24. –P. 633–645.
12. Васильев Г.П. Геотермальные теплоснабжающие системы теплоснабжения // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. –С. 33–41.
13. Васильев Г.П., Тимофеев Н.А. Энергетический потенциал вентиляционных выбросов жилых зданий в Москве // АВОК. – 2010. – № 1. –С. 24–32.
14. Vasilyev G. P., Peskov N. V., Gornov V. F. et al. Specifics of Mathematical Simulation and the Method of Modeling for Subway Tunnels Thermal Conditions // Appl. Mechan. Mat. – 2015. –V. 704. –P. 85–92.
15. Васильев Г.П. Результаты натурных исследований теплового режима экспериментального энергоэффективного дома // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – № 6. – С. 3.
16. Васильев Г.П., Горнов В. Ф., Колесова М. В. И др. Теплоснабсы в московском метро // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – № 2. –С. 54–59. ■

Окончание статьи читайте в следующем номере.