

УДК 625.786, 621.1, 621.59

**УСТРОЙСТВО РЕВЕРСИВНОЙ ТОННЕЛЬНОЙ  
ВЕНТИЛЯЦИИ МЕТРОПОЛИТЕНОВ  
С ЧАСТИЧНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ВОЗДУХА**

**Магистр техн. наук КАЩЕЕВА О. В., инж. ВОРОНОВ Е. О.,  
канд. техн. наук КАЩЕЕВ В. П., инж. ЖИДОВИЧ И. С.,  
докт. техн. наук СОРОКИН В. Н., студ. КЛИМЕНКОВА О. Л.**

*РУП «Минскэнерго»,  
Белорусский национальный технический университет*

Опыт эксплуатации метрополитенов показывает, что на самочувствие пассажиров и работоспособность обслуживающего персонала существенно влияют гигиенические условия, а также состояние воздушной среды и микроклимата в тоннелях и сооружениях. Установлено, что основными вредностями в метрополитене являются теплота, влага и двуокись углерода,

выделяющиеся от трансформации энергии, затрачиваемой на движение поездов и работу оборудования, от жизнедеятельности пассажиров и обслуживающего персонала, а также различные газы, которые могут попасть в тоннель с наружным воздухом, из грунтов, коммуникаций, пересекающих тоннели и рядом с ними расположенных. Кроме того, вредны для метрополитена пыль, образующаяся в тоннелях и поступающая с вентиляционным воздухом, масляный туман и микробиологическая обсемененность воздуха. Как правило, наружный воздух, подаваемый в тоннели, не обрабатывается (из-за больших затрат на этот процесс). Температура и влажность воздуха влияют на сохранность и безаварийность работы технологического оборудования метрополитена. Относительная влажность воздуха более 75 % и его температура выше 35 °С неблагоприятно сказываются на работе электротехнического оборудования. В летний период при большой влажности и высокой температуре наружного воздуха во избежание появления конденсата на внутренних поверхностях тоннелей и станций могут потребоваться осушение наружного воздуха и устройство местных подогревов электротехнического оборудования [1].

Устройство для обогрева ствола шахты [2] разработано для предотвращения его обмерзания в зимнее время и создания более комфортных условий. Оно содержит калорифер, через который пропускают подаваемый в ствол шахты атмосферный воздух. Там воздух нагревается отработанным воздухом, выходящим из шахты.

К недостаткам устройства можно отнести невозможность регулирования состава подаваемого в тоннели воздуха и его влажности.

Также известно устройство для охлаждения воздуха шахт [3], содержащее шахтную холодильную установку, включающую компрессор, конденсатор, дроссель, испаритель, канал подачи наружного воздуха, систему подачи хладоносителя и воздухоохладительные аппараты, размещенные в глубоких горизонтах шахты. Теплота, удаляемая из шахты, сбрасывается в окружающую среду. Проблема глубоких шахт связана с ростом температуры с глубиной – в глубоких шахтах, как, например в ЮАР, она доходит до 50 °С и выше.

Недостатки этого устройства – большие затраты электроэнергии и невозможность регулирования состава подаваемого в тоннели воздуха и его влажности.

Разработано устройство для вентиляции шахт [4], включающее шахтную холодильную установку, имеющую компрессор, теплообменники – конденсатор и испаритель, дроссельное устройство, канал подачи наружного воздуха, систему подачи хладоносителя и воздухоохладительные аппараты в глубоких горизонтах шахты. В зимний период для предотвращения обмерзания ствола шахты наружный воздух на входе в нее подогревают в конденсаторе.

Недостатки устройства – большие затраты электроэнергии и невозможность регулирования состава подаваемого в тоннели воздуха и его влажности.

Устройство для регулирования теплового режима тоннелей метрополитена [5] содержит оборудование для нагнетания атмосферного воздуха с поверхности в районе центральной сбойки в тоннели перегона метропо-

литена. Боковыми сбойками и станциями тоннели метрополитена разбиты на отдельные контуры с равным тепловыделением, где циркуляционный воздух воспринимает теплоту, выделившуюся поездами и другими источниками. В боковых сбойках находятся холодильные установки, в которых циркуляционный воздух охлаждается до исходной температуры. Смешиваясь с приточным воздухом, он охлаждает его, приводя тем самым к нормализации климатических условий. Исходящий воздух отсасывают через подплатформенное пространство станций и подходные тоннели и по шахтам выводят на поверхность.

Недостатками устройства являются большие затраты электроэнергии и невозможность регулирования состава подаваемого воздуха. Кроме вредных веществ из наружного воздуха, геологические породы тоннелей могут «дышать» – выделять какие-то газы, которые остаются в циркуляционном контуре.

Известно устройство для реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией воздуха, содержащее вентиляционные тоннели, перегонные тоннели, соединенные вентиляционными сбойками, вентиляционные шахты, стволы которых сообщены с вентиляционными камерами тоннельной вентиляции, соединенными с перегонными тоннелями. Устройство имеет установки для подачи наружного воздуха, включающие воздухозаборные механизмы, вентиляторы, регуляторы расхода воздуха, содержащие автоматически регулируемые жалюзи, вентиляторы для принудительного удаления отработанного воздуха на поверхность, установки для частичной рециркуляции отработанного воздуха [6, 7].

К недостаткам этого предложения можно отнести нестабильный температурный и влажностный режим воздуха в тоннелях и на станциях метрополитена, вызванный резкими изменениями температуры и влажности наружного воздуха в течение года и суток.

Устройство реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов дополнительно содержит тепловой насос, испарительная зона которого служит для охлаждения части удаляемого отработанного воздуха и соединена с сепаратором разделения жидкой и газообразной фракций, блок их отдельной очистки и удаления в канализацию нейтрализованной жидкой фракции, устройство для возвращения газообразной части в сооружения метрополитена, соединяющие их трубопроводы с арматурой. Кроме того, оно имеет рекуперативные теплообменные устройства для нагрева поступающего наружного воздуха отработанным и исполнительно-аналитический комплекс для осуществления оптимальной работы устройства в автоматическом режиме.

При работе часть отработанного воздуха охлаждается в испарительной зоне теплового насоса до выделения конденсата, затем в сепараторе разделяется на жидкую и газообразную фракции, в блоке их отдельной очистки жидкая фракция нейтрализуется и удаляется в канализацию, газовая фракция очищается, а в устройстве для возвращения газообразной части в сооружения метрополитена смешивается с наружным приточным воздухом и затем вновь подается в перегонные тоннели. При этом доля отбираемого и

возвращаемого воздуха составляет 5–7 % от общего количества удаляемого воздуха, порцию отбираемого воздуха охлаждают до 5–7 °С.

Отбираемая теплота после повышения температурного уровня в испарительной зоне теплового насоса используется для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции сооружений и оборудования метрополитена, в холодный период часть теплоты используется для создания тепловой завесы входных устройств метрополитена, в зимний период часть теплоты подают в приточные вентиляционные шахты и порталы, соединяющие закрытую трассу метрополитена с открытой, в зимний период отбирается максимальное количество воздуха, а в летний – минимальное.

Рекуперативные теплообменные устройства для нагрева поступающего из атмосферы воздуха отработанным позволяют при необходимости повышать температуру поступающего в метрополитен воздуха до необходимого уровня.

Исследования показали, что если охладить воздух до точки росы, т. е. до той температуры, когда вода переходит в жидкую фазу, то основные вредные вещества, содержащиеся в воздухе, переходят в конденсат. Таким образом, порция воздуха, которую смешивают с поступающим в метрополитен атмосферным воздухом, не содержит основных вредностей метрополитена – теплоты и влаги. Наружный же воздух может дополнительно содержать пыль, масляный туман, жидкие и твердые продукты промышленных выбросов, выхлопные газы автомобильного транспорта. Поэтому добавление в атмосферный воздух, поступающий в метрополитен, порции очищенного воздуха со стабильными температурой и влажностью, приводит к уменьшению колебаний этих параметров во времени, созданию комфортных условий для пассажиров, обслуживающего персонала и работы оборудования.

Так как теплоту у порции рециркулирующего воздуха отбирают в испарительной зоне теплового насоса, в его конденсатной зоне потенциал теплоты повышается до нужного уровня и она может быть использована для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения сооружений и оборудования метрополитена. Благодаря этому экономится энергия, которую надо было затратить для этих целей. В холодный период часть этой теплоты может быть использована для создания тепловой завесы входных устройств метрополитена. Для предотвращения обледенения в зимний период часть теплоты может быть подана в приточные вентиляционные шахты и порталы, соединяющие закрытую трассу метрополитена с открытой. Это уменьшает энергозатраты метрополитена. В связи с тем что зимой возрастает требуемое количество теплоты, в этот период отбирается максимальное количество воздуха, а в летний – минимальное.

На рис. 1 изображен участок системы вентиляции метрополитена, а на рис. 2 – разрез А–А на рис. 1.

Предлагаемая система реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией содержит перегонные вентиляционные шахты 1, стволы которых сообщены с вентиляционными камерами 2 тоннельной вентиляции. Камеры сообщены, в свою очередь, с параллельными перегонными тоннелями 3 посредством нижних вентиляционных тоннелей 4. В участке системы вентиляции, представленном на рис. 1, ствол шахты, вентиляционная камера и нижний вентиляционный тоннель 4 расположены между параллельными перегонными тоннелями. К стволу каждой шахты при-

мыкает вентиляционная камера вентиляционной установки с расположенными в ней вентиляторами 5, переходящая в нижний вентиляционный тоннель 4 с шумопоглотителями 6. С другой стороны ствол шахты сообщен с вентиляционным тоннелем 7, в котором установлен регулятор расхода воздуха, в частности автоматически регулируемые жалюзи 8. Тоннель 7 примыкает к перегонному тоннелю и сообщен с ним на участке, расположенном по ходу движения поезда перед вентиляционной камерой и нижним вентиляционным тоннелем 4. В стволе шахты по всей его высоте вертикальной перегородкой 9 образованы два изолированных канала 10 и 11. Верхний конец канала 10 заканчивается воздухоудаляющим устройством (киоском) 12, а верхняя часть канала 11 сообщена с вентиляционным тоннелем 13, а он – с воздухозаборным устройством 14. Нижние концы каналов 10 и 11 сообщены с вентиляционным тоннелем 7 и вентиляционной камерой соответственно.

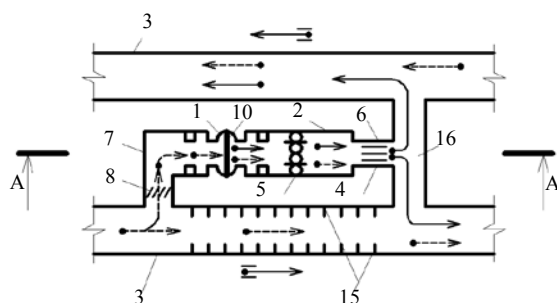


Рис. 1. Устройство реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией воздуха:  $\Rightarrow$  – направление движения поезда;  $\bullet \rightarrow$  – то же потоков воздуха системы вентиляции;  $\circ \rightarrow$  – то же циркуляционных воздушных потоков;  $\dashrightarrow$  – то же удаляемого в атмосферу воздуха

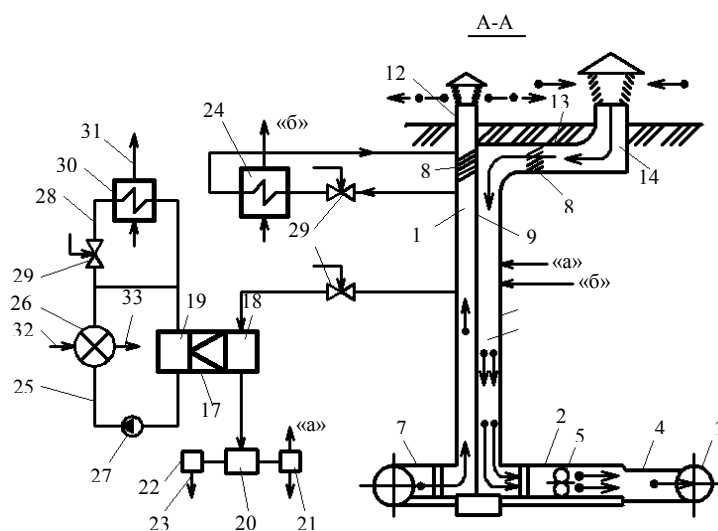


Рис. 2. Разрез А-А на рис. 1

Так же как и в вентиляционном тоннеле 7, в верхнем вентиляционном тоннеле 13 канала 11 и на выходе из канала 10 установлены регуляторы расхода

воздуха – автоматически регулируемые жалюзи. Перегородка может быть выполнена складной для проведения ремонтных работ в стволах вентиляционных шахт. Возможен вариант перегородки из мягкого эластичного материала. В перегонном тоннеле на участке между местом его сообщения с вентиляционным тоннелем 7 и нижним вентиляционным тоннелем 4 установлены диафрагмы 15. Перегонные тоннели соединены также вентиляционными сбойками 16.

Особенность предлагаемой системы реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией состоит в том, что она содержит тепловой насос 17 с испарительной и конденсационной частями 18 и 19 соответственно, сепаратор 20 для разделения полученных в холодильнике – испарительной зоне 18 теплового насоса – жидкой и газообразной фаз после охлаждения использованного в метрополитене воздуха, идущего по каналу 10, блок 21 очистки воздуха, очистное устройство 22 для нейтрализации жидких фракций с линией 23 подачи продуктов нейтрализации в канализацию, соединяющие их трубопроводы с арматурой, в том числе линия «а» подачи очищенного воздуха в тоннель 11, и исполнительно-аналитический комплекс для осуществления работы устройства в автоматическом режиме.

Кроме того, имеется рекуперативный теплообменник 24 для подогрева «свежего», поступающего из атмосферы воздуха за счет теплоты удаляемого из метрополитена по каналу 10 отработанного воздуха с линией «б» подачи его в канал 11.

Через конденсатную зону 19 теплового насоса проходит линия 25 теплоснабжения потребителя 26 теплоты (отопление, горячее водоснабжение и вентиляция сооружений и оборудования метрополитена), имеющая водяной насос 27, байпасную линию 28 с регулятором 29, теплообменником 30 с линией 31 подачи теплоты в холодный период для создания тепловой завесы входных устройств метрополитена и подачи в зимний период части этой теплоты в приточные вентиляционные шахты и в порталы, соединяющие закрытую трассу метрополитена с открытой. Также через потребителя теплоты проходит линия его традиционного теплоснабжения – по линии 32 поступает прямая сетевая вода, а по линии 33 уходит обратная сетевая вода.

Устройство работает следующим образом.

Часть удаляемого из метрополитена воздуха из канала 10 пропускают через испарительную зону 18 теплового насоса, где происходит ее охлаждение ниже точки росы, что приводит к конденсации части влаги. Большая часть вредных веществ переходит в эту сконденсировавшуюся влагу. Затем в узле-сепараторе разделяют сконденсировавшиеся и несконденсировавшиеся компоненты. Очистку полученных фракций производят отдельно (воздуха – в очистном устройстве, жидкости – в очистном устройстве), что значительно упрощает и удешевляет ее – жидкие фракции, в основном углекислоту, можно нейтрализовать щелочью, газы – очистить на различных фильтрах. Очищенный воздух по линии «а» поступает в канал 11, нейтрализованные жидкие вещества направляют в канализацию по линии 23.

В холодный период года работает рекуперативный теплообменник для подогрева «свежего» поступающего из атмосферы воздуха за счет теплоты удаляемого из метрополитена по каналу 10 отработанного воздуха с линией «б» его подачи в канал 11, включается байпасная линия с регулятором,

теплообменником с линией подачи теплоты для создания тепловой завесы входных устройств метрополитена и для подачи части этой теплоты в приточные вентиляционные шахты и порталы, соединяющие закрытую трассу метрополитена с открытой.

Тепловой насос повышает температурный уровень низкопотенциальной теплоты рециркулируемого воздуха, что позволяет использовать эту теплоту для отопления, горячего водоснабжения и вентиляции. Поэтому для отопления, вентиляции и горячего водоснабжения теплового потребителя, его служебных и вспомогательных помещений, используют теплоту, выделяющуюся в тепловом насосе, а при ее недостатке – теплоту традиционных источников.

Команды для подачи в канал 11 определенного количества атмосферного воздуха, для регенерации фильтров, включения и отключения исполнительных органов, изменения расходов сред дает исполнительно-аналитический комплекс, анализирующий текущую ситуацию.

Под воздействием вентиляторов, работающих на приток наружного воздуха в перегонные тоннели, наружный воздух засасывается через вентиляционные киоски системы, поступает по верхним вентиляционным тоннелям через расположенные в них автоматически регулируемые жалюзи в верхнюю часть каждого из стволов шахт. После этого наружный воздух смешивается с потоком воздуха, поступающим по линии «б», нагретым до положительных температур сбросной теплотой метрополитена в рекуперативном теплообменнике (только в холодный период) и по линии «а» с холодным воздухом, прошедшим через испарительную зону теплового насоса. Смешение этих потоков воздуха происходит в верхней части стволов шахт.

Вследствие создаваемого вентиляторами разряжения и поршневого эффекта движения поездов нагретый внутритоннельный воздух из перегонных тоннелей по примыкающим к ним вентиляционным тоннелям через расположенные в последних автоматически регулируемые жалюзи и сопряженные с вентиляционными тоннелями каналы 10 поступает в верхнюю часть стволов шахт, отдает свою теплоту в тепловом насосе и рекуперативном теплообменнике (в холодный период) и удаляется в атмосферу через киоск.

Смешение таких потоков воздуха позволяет получить нужную стабильную температуру смеси, а затем смешанный воздух поступает по вентиляционным каналам 11 стволов шахт в перегонные тоннели с помощью вентиляторов, расположенных в вентиляционных камерах и принудительно подающих смешанный воздух в сопряженные с перегонными тоннелями нижние вентиляционные каналы 4 через установленные в них глушители шума. Далее часть потока воздуха поступает по перегонным тоннелям, а часть – через вентиляционные сбойки 15 в другие параллельные перегонные тоннели, где смешивается с потоками воздуха, движущимися по этим тоннелям. Причем смешение наружных вентиляционных потоков воздуха производится также в количествах, исключающих ухудшение качества подаваемого в метрополитен смешанного потока воздуха по санитарным нормам, требующим не превышения нормативного содержания в смешанном потоке газовых и бактериальных загрязнений. В перегонных тоннелях устанавливаются диафрагмы для создания дополнительного аэродинамического сопротивления циркуляционным потокам воздуха, движущимся по перегонным тоннелям, что обеспечивает поступление большей части нагретого до положительной

температуры циркуляционных потоков воздуха по вентиляционным тоннелям к стволам шахт.

**Пример использования** предлагаемого технического решения и технико-экономическая оценка целесообразности применения системы утилизации теплоты вытяжного воздуха в системе теплоснабжения станции метрополитена. Расчет сделан для станции «Тракторный завод» Минского метрополитена.

### Технико-экономическая оценка

Исходные данные:

- |   |                      |
|---|----------------------|
| 1. Расчетная тепловая нагрузка, в том числе на:   | 173,9 кВт            |
| • отопление   | 93,3 кВт             |
| • горячее водоснабжение   | 80,6 кВт             |
| 2. Годовая продолжительность тепловой нагрузки, в том числе на:                         |                      |
| • отопление   | 7000 ч               |
| • горячее водоснабжение   | 3 ч/сут., 1095 ч/год |
| 3. Стоимость энергоносителей (средняя за сутки на 2010 г.):                             |                      |
| • 1 МВт·ч электроэнергии, потребляемой тепловыми насосами и другим электрооборудованием | 150 дол.             |
| • 1 Гкал теплоты из системы ЦТ  | 60 дол.              |

#### Технические предложения:

**Вариант 1 (базовый).** Централизованное теплоснабжение от городской тепловой сети (ЦТ).

**Вариант 2.** Теплоснабжение от теплонасосной установки (ТНУ) на основе теплового насоса «воздух–вода» с блоком очистки и охлаждения воздуха на станции метро.

Результаты технико-экономических расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование показателя	Единица измерения	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2
Годовое потребление теплоты, всего	Гкал	525,2	525,2
в том числе на:			
• отопление	—«—	449,3	449,3
• горячее водоснабжение	—«—	75,9	75,9
Потребляемая мощность теплоисточниками, всего,	кВт	—	34,8
• в том числе ТНУ	—«—	—	34,8
Годовой расход:			
• теплоты из сети ЦТ	Гкал	525,2	—
• электрической энергии ТНУ*	МВт·ч	—	152,7

Окончание табл. 1

Наименование показателя	Единицы измерения	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2
Единовременные капитальные вложения на теплоснабжение, всего	тыс. дол.	15,0	58,0
в том числе на сооружение:			



• сети ЦТ	—«—	15,0	—
• ТНУ	—«—	—	58,0
Ежегодные эксплуатационные расходы, всего в том числе стоимость:	тыс. дол.	32,7	27,0*
• теплоты от сети ЦТ	—«—	31,5	—
• электрической энергии, потребляемой ТНУ		—	22,9
Приведенные затраты	тыс. дол.	34,2	32,8
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений	лет	—	7,5*

\* Без учета эффекта сокращения расхода электрической энергии на привод вентиляторов, удаляющих теплоизбытки при теплоснабжении по варианту 1.

Кроме того, применение устройства позволяет создать комфортные условия в метрополитене, использовать ранее бесполезно выбрасываемую теплоту, а также значительно упростить эксплуатацию тоннельных сооружений и уменьшить эксплуатационные расходы.

### ВЫВОД

Таким образом, задача исследования – стабилизация температурного и влажностного режимов атмосферы метрополитена при его работе, создание комфортных условий для пассажиров и обслуживающего персонала, уменьшение влияния вредных веществ, вносимых наружным воздухом, уменьшение энергетических затрат на обслуживание помещений метрополитена – достигнута.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Цодиков, В. Я. Вентиляция и теплоснабжение метрополитенов / В. Я. Цодиков. – М.: Недра, 1975. – С. 29–30.
2. А. с. 64099 СССР, Кл. Е 21 F 3/00. Способ обогрева ствола шахты / Б. Н. Лобаев. – Заявл. 05.11.1940 в Наркомуголь за № 38307 (303.604); опубл. 31.08.44, зарегистрировано в Бюро изобретений Госплана при СНК СССР.
3. Щербань, А. М. Кондиционирование рудничного воздуха / А. М. Щербань, А. Н. Ягельский. – М.: Углетехиздат, 1956. – С. 171–172.
4. А. с. 592991 СССР, МКИ Е 21 F 3/00. Шахтная воздухоохладительная установка / В. А. Бойко, В. Б. Скрыпников, В. К. Черниченко, А. Г. Аничкин, О. К. Помазан. – № 2060779/22-03; заявл. 19.09.74; опубл. 15.02.78 // Открытия. Изобретения. – 1978. – № 6.
5. А. с. 1567793 СССР, МКИ Е 21 F 3/00. Способ регулирования теплового режима тоннелей метрополитена / С. Г. Гендлер, В. А. Соколов, Э. М. Юшковский, Т. С. Быстрова. – № 4385001/31-03; заявл. 29.02.88; опубл. 30.05.90 // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 20.
6. Пат. 2243 846 ФРГ, Belueftungssystem fuer U-Bahnen, Erfinder: Swaty, Franz, Vertreter: Magenbauer, R., МКИ Е 01g 7/02, заявл. 07.09.72; опубл. 17.05.73 с приоритетом в Австрии от 16.09.71.
7. А. с. 1090884 СССР, МКИ Е 21 F 1/00. Способ реверсивной тоннельной вентиляции метрополитенов с частичной рециркуляцией воздуха / В. Я. Цодиков, В. В. Котов, И. В. Маковский, А. А. Абросов, П. А. Васюков, Э. В. Сандуковский, В. Г. Россковский, Г. А. Земцов. – № 3537622/29-03; заявл. 26.11.812; опубл. 07.05.84. // Открытия. Изобретения. – 1984. – № 17.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 07.07.2011