

УДК 697.11

*А.Г. Рымаров, К.И. Лушин***ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА  
ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА  
ЛИНЕЙНЫХ ПОДЗЕМНЫХ  
СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ  
АВТОТРАНСПОРТНОГО  
ТОННЕЛЯ**

Рассмотрены вопросы анализа теплового режима подземного сооружения с учетом особенностей эксплуатации, характерных для автотранспортных тоннелей. Для моделирования теплового режима подземного сооружения типа автотранспортного тоннеля использована математическая модель, учитывающая специфические особенности объекта. Методы моделирования температурных режимов разработаны на кафедре отопления и вентиляции МГСУ и апробированы на многих реальных объектах для различных организаций г. Москвы.

*Ключевые слова:* тоннель, вентиляция, воздухообмен, тепловой режим.

UDK 697.11

*A.G. Rymarov, K.I. Lushin***FEATURES OF THERMAL  
BEHAVIOR CALCULATING  
OF LINEAR BURIED  
STRUCTURES  
AS EXEMPLIFIED  
BY AUTOMOTIVE TUNNEL**

Questions analyze of the buried structures thermal behavior are considered inclusive of the automotive tunnels operating characteristics. Composed of the heating and ventilation department of MSUCE the mathematical model that is taken into account the object peculiarity is used to simulate the thermal behavior of buried structure such as automotive tunnel. Simulation modes the temperature conditions are developed of the heating and ventilation department of MSUCE and are tested on many real objects for various organizations in Moscow.

*Key words:* tunnel, ventilation, air conditioning, thermal behavior.

Одной из характерных особенностей современных городов является уплотнение транспортной сети и инженерной инфраструктуры. Строительство дорог все чаще осуществляется с использованием многоярусных развязок и многоуровневых тоннелей, в то время как прокладка городских коммуникаций ведется во все более стесненных условиях городского подземного пространства. Наряду с изучением вопросов непосредственного проектирования и строительства встают и вопросы повышения энергетической эффективности и безопасности при эксплуатации уже введенных в эксплуатацию сооружений. Одной из основ исследований в указанном направлении становится опыт изучения и понимание проблем теплового, влажностного и газового режима как здания вообще, так и подземного сооружения в частности. Специфика теплового режима подземных сооружений заключается в массивности слоя грунта, окружающего тоннели, что определяет большую тепловую инерцию любых колебаний температуры. Это приводит к значительному запаздыванию эффекта как от внешних воздействий среды, так и от попыток скорректировать воздушно-тепловой режим с помощью технологических и инженерных систем. В результате возникают технические трудности при поддержании и управлении заданными параметрами внутренней среды таких сооружений.

Для сооружений с массивными ограждениями технические решения систем обеспечения микроклимата отличаются от современных типовых решений, применяемых, как правило, в обычном гражданском здании.

Температура воздуха тоннеля или подземного канала будет находиться под влиянием нескольких основных факторов: температуры грунта, окружающего тоннель, со всей гидрологией, температуры и расхода наружного воздуха, подаваемого в тоннель для проветривания, внутренних теплоизбытков.

При необходимости обеспечения требуемых температурных условий в тоннеле правильное решение этого вопроса возможно лишь при использовании современных методов, позволяющих проводить анализ нестационарных режимов, протекающих в массивных ограждениях тоннеля. Речь идет о необходимости проведения анализа годовых циклов изменения температурного режима грунта и атмосферного воздуха. Дело в том, что после окончания строительных работ и запуска тоннеля в эксплуатацию он довольно скоро входит в новый квазистационарный режим и уже по прошествии нескольких лет можно говорить об установившихся условиях как внутри сооружения, так и в толще окружающего тоннель грунта. При этом в обязательном порядке необходимо учитывать то влияние, которое со временем оказывает новый подземный объект на установившийся в течение веков температурный режим подземного пространства. В ряде случаев под влиянием тепла или влаги, вносимых в открытое пространство объекта, могут изменяться не только температурные, но, возможно, и механические свойства грунтового массива.

Моделирование температурного режима теплоинерционных сооружений возможно с использованием математических моделей теплового режима помещения и здания, ранее разработанных на кафедре отопления и вентиляции МГСУ. Эти модели позволяют учитывать начальное состояние и динамику изменения теплового режима сооружения с учетом изменчивости климатических условий, режима эксплуатации и технологических нагрузок. Для моделирования теплового режима подземного сооружения типа автотранспортного тоннеля составлена математическая модель, учитывающая специфические особенности объекта.

По сложившемуся представлению поисковые исследования теплового режима уникальных объектов должны опережать проектные работы. Серии расчетов позволят выявить и лучше понять ситуацию, связанную с изменяющимся сезонно в годовом цикле тепловым режимом.

Тоннель является массивным подземным сооружением и на его температурный режим суточные изменения температуры наружного воздуха влияния не оказывают. Для расчетов температурного режима в годовом цикле за минимальную температуру принята средняя температура января, а за максимальную — средняя температура июля. Средняя годовая температура принята равной  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3], температура задана меняющейся по гармоническому закону. В результате расчета получены графики изменения температуры воздуха, грунта тоннеля в годовом цикле.

Расчет нестационарного теплового режима тоннеля проводился для выявления температуры внутреннего воздуха при различных вариантах режимов эксплуатации, что позволяет выявить в условиях наружного климата, приближенных к реальным в годовом режиме, температурные условия в тоннеле в зимний и летний периоды года.

В основу метода расчета положен подход, когда все сооружение или отдельная конструкция представляются состоящими из множества элементов, между которыми происходят процессы обмена.

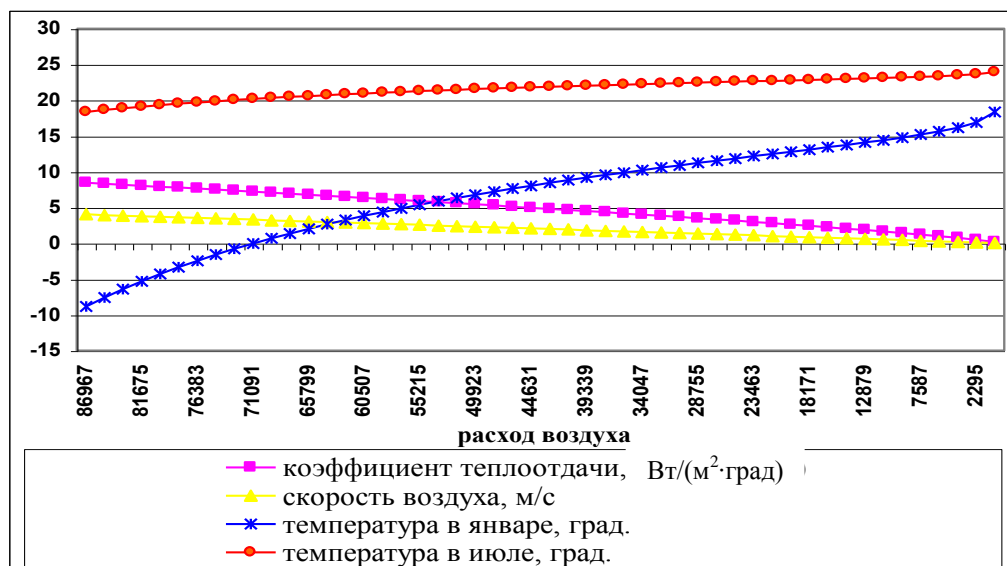
Тепловой режим воздуха тоннеля, ограждающих конструкций, грунта описывается системой дифференциальных уравнений тепловых балансов отдельных элементарных блоков. Число уравнений равно числу блоков  $N$ . Каждое уравнение такой системы имеет вид

$$dt / d\tau = f_i(t_1, t_2, t_3, \dots, t_i \dots t_N),$$

где  $t_i$  — температура  $i$ -го элемента;  $\tau$  — время.

Функциональные зависимости учитывают закономерности теплообмена элемента теплопроводностью, конвекцией и излучением с соседними элементами.

Для описания конвективного и лучистого теплообмена в помещении используются зависимости, аналогичные описанным в литературе [2]. Система уравнений решается стандартными методами по явной или неявной схемам. Условия однозначности включают суточное изменение температуры наружного воздуха, режимы работы тоннеля и мощность теплоизбытков. Начальные условия для решения задачи находят прогонкой нескольких продолжительных циклов до достижения так называемого квазистационарного режима. Для расчета используются составленные нами программы. Методы моделирования температурных режимов разработаны на кафедре отопления и вентиляции МГСУ и апробированы на многих реальных объектах для различных организаций г. Москвы. Характерный результат математического моделирования — изменение температуры воздуха, внутренних поверхностей и в толще ограждений и грунта показан на рисунке.



Моделирование температурного режима тоннеля связано с необходимостью исследования двумерного температурного поля в толще грунта. Тоннель имеет геометрию круга, разделенного на части, которые контактируют с грунтом. Основные элементы — это проезжая дорога для автотранспорта, каналы для притока и удаления воздуха, канал для различных коммуникаций. Каждая из этих частей отделена от других строительными конструкциями и имеет различную температуру воздуха и отличающийся характер теплообмена с грунтом. Расчет производится для каждого блока, на которые разбивается весь расчетный массив грунта. Известно, что на глубине около 10 м изменений температуры практически не происходит, поэтому массив грунта ограничен радиусом 10 м, с температурой около  $+8^{\circ}$ . Так как тоннель является симметричным в поперечном сечении, то для снижения нагрузки на время счета примем для расчета только одну из симметричных половин круга, другая часть контактирует с расчетной через ось тепловой симметрии, через которую теплообмена нет. Созданы три массива ячеек массива грунта: первый — для проезжей части и вытяжного канала, второй — для приточного канала и третий — для канала с электрокоммуникациями. Размеры ячеек грунта приняты одинаковыми для трех массивов. Так как имеет место круг, то ячейки будут иметь форму близкую к трапеции, что связано с увеличением длины окружности с увеличением радиуса. Для

сглаживания неравномерности, получаемой при осреднении, принято количество ячеек максимально возможным и шаг расчета минимально возможным. В массиве ячеек выделены ячейки с различными граничными условиями, для каждой из которых было составлено дифференциальное балансовое уравнение. Все балансовые дифференциальные уравнения связаны одно с другим, что позволяет добиться моделирования и получения взаимосвязанных результатов.

Канал, по которому поступает воздух для вентиляции тоннеля, оказывает влияние на температуру подаваемого воздуха. Воздух, контактируя с массивом грунта, отдает или принимает тепло, что способствует изменению собственной температуры потока. Одной из составных частей задачи изучения воздушно-теплого режима описываемого сооружения является расчет изменения параметров приточного воздуха. Воздух перемещается по каналу постоянного сечения и уходит через определенное расстояние в пространство проезжей части тоннеля, что приводит к изменению расхода воздуха по длине канала и изменению теплообмена между воздухом и грунтом. Воздух поступает на глубину тоннеля в 30 м через вертикальные каналы, где температура воздуха так же претерпевает изменения, и это так же необходимым образом учитывается. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенкам канала определялся на основании теории подобия. Были определены текущие значения расхода и критерия  $Re$  и через значение числа  $Nu$  получены изменяющиеся по длине канала значения коэффициента конвективного теплообмена. Расчеты позволили определить температуру воздуха в конце вертикального канала при входе в горизонтальный канал. А в горизонтальном канале так же удалось рассчитать изменение температуры по длине, что позволило иметь представление о диапазоне изменений в любой части тоннеля температуры приточного воздуха, который влияет на температурную обстановку в проезжей части тоннеля.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богословский В.Н. Строительная теплофизика. Изд. 2-е. М. : Стройиздат, 1982.
2. Лариков Н.Н. Теплотехника. М. : Стройиздат, 1985.
3. СНиП 23-01—99. Строительная климатология. 2000.
4. СНиП 23-01—2003. Тепловая защита здания. 2003.

#### REFERENCES

1. Bogoslovsky V.N. Stroitel'naya teplofizika [Construction thermal physics]. Moscow, 1982.
2. Larikov N.N. Teplo tekhnika [Thermal technique]. Moscow, 1985.
3. SNiP 23-01—99. Stroitel'naya klimatologiya [Building climatology]. 2000.
4. SNiP 23-01—2003. Teplovaya zashchita zdaniya [Thermal protection of a building]. 2003.

*Поступила в редакцию в августе 2011 г.*

Об авторах: **Рымаров** Андрей Георгиевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры отопления и вентиляции, МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26, (499) 188-36-07;

**Лушин** Кирилл Игоревич, старший преподаватель кафедры отопления и вентиляции, МГСУ, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26, (499) 188-36-07, [tgvmgsu@mail.ru](mailto:tgvmgsu@mail.ru)

About authors: **Rymarov** Andrey Georgievich, Candidate of Engineering Science, Assistant Professor, Assistant Professor of heating and ventilation department, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye highway, 26;

**Lushin** Kirill Igorevitch, Senior Professor of heating and ventilation department, Moscow State University of Civil Engineering, 129337, Moscow, Yaroslavskoye highway, 26, [tgvmgsu@mail.ru](mailto:tgvmgsu@mail.ru)