

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ ОБДЕЛКИ ПРИПОРТАЛЬНОГО УЧАСТКА ПРОТЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ В ХОЛОДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Лаврентий Александрович Кияница

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доб. 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitza@yandex.ru

Иван Владимирович Лугин

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории рудничной аэродинамики, тел. (383)205-30-30, доб. 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

При эксплуатации протяженных железнодорожных тоннелей в суровых климатических условиях Сибири и Дальнего востока существует проблема обмерзания тоннельной обделки на припортальных участках тоннелей в холодный период года. Из-за циклического воздействия отрицательных температур наружного воздуха происходит постоянное замерзание и оттаивание поверхностного слоя тоннельной обделки, что ведет к ее быстрому морозному разрушению. Особенно сильно этот эффект проявляется для тоннелей с закрывающимися припортальными воротами и односторонним движением поездов на участке у выходного портала. Это объясняется тем, что при каждом проходе поезда через выходной портал в тоннель поступает значительное количество холодного атмосферного воздуха, по величине измеримое с объемом проходящего состава. В данной работе путем анализа результатов вычислительного эксперимента обоснована протяженность зоны захолаживания и температура тоннельной обделки в зоне контакта «наружный воздух – тоннельная обделка» от выходного портала вглубь тоннеля в зависимости от технологических параметров и климатических условий тоннеля. Корректность полученных закономерностей обоснована сходимостью результатов вычислительного эксперимента и аналитических расчетов, основанных на методе вытеснения.

Ключевые слова: железнодорожный тоннель, поршневой эффект, вентиляция, теплообмен, тоннельная обделка.

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF CHILLING ZONE OF LINING OF NEAR-ENTRANCE SITE OF LONG RAILWAY TUNNELS IN COLD SEASON

Lavrentiy A. Kijanitsa

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Junior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: Lavrentij.Kijanitza@yandex.ru

Ivan V. Lugin

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher, Mine Aerodynamics Laboratory, phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: ivlugin@misd.ru

When operating long railway tunnels in harsh climatic conditions of Siberia and the Far East, there is a problem of tunnel lining freezing on near-entrance sites in the cold season. Due to the cyclical effects of negative outside temperatures, the surface layer of tunnel lining is constantly freezing and thawing, which causes rapid frost deterioration. This effect is especially pronounced for tunnels with closing near-entrance gates and one-way train traffic on the exit site. This is explained by the fact that at each train passage through the exit site, a significant amount of cold atmospheric air enters the tunnel. The length of chilling zone and the temperature of tunnel lining in the “outside air – tunnel lining” contact zone from the exit site deep into the tunnel, depending on the technological and climatic parameters of the tunnel are justified by analyzing the results of computational experiment. The correctness of obtained regularities is justified by the convergence of experimental results and analytical calculations based on the displacement method.

Key words: railway tunnel, piston effect, ventilation, heat exchange, tunnel lining.

Введение

Одной из проблем, возникающих при эксплуатации протяженных железнодорожных тоннелей в холодный период года, является обмерзание тоннельной обделки [1-2], в том числе на припортальных участках тоннелей. Из-за циклического воздействия отрицательных температур наружного воздуха происходит постоянное замерзание и оттаивание поверхностного слоя тоннельной обделки, что ведет к ее быстрому морозному разрушению. Особенно сильно этот эффект проявляется для тоннелей с закрывающимися припортальными воротами. При каждом выходе поезда из портала в тоннель через зазор между поездом и обделкой тоннеля поступает значительное количество холодного атмосферного воздуха, по величине соизмеримое с объемом проходящего состава [10]. Это обусловлено зоной разрежения, возникающей за хвостовым вагоном состава. Поэтому обоснование способов борьбы с обмерзанием тоннельной обделки на припортальных участках протяженных транспортных тоннелей является весьма актуальной задачей.

Для выбора и обоснования способов борьбы с обмерзанием обделки в припортальной области у выходного портала тоннеля необходимо определить:

– протяженность зоны захлаживания обделки от выходного портала вглубь тоннеля;

– распределение температуры тоннельной обделки в зоне контакта «наружный воздух – тоннельная обделка» от выходного портала вглубь тоннеля в зависимости от технологических и климатических параметров тоннеля;

Методы исследования

Протяженность зоны захлаживания обделки от выходного портала вглубь тоннеля и температура тоннельной обделки в зоне контакта «наружный воздух – тоннельная обделка» определена методами вычислительной аэродинамики и теплообмена (метод контрольных объемов) в программной комплексе Ansys CFX. Решение базируется на совместном численном решении уравнений (1)-(5) с применением $k-\varepsilon$ RNG модели турбулентности:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0, \quad (1)$$

– уравнение моментов:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \Lambda + S_M, \quad (2)$$

– уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial \tau} - \frac{\partial p}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{u} H) = \nabla(\lambda \nabla t) + \nabla(\vec{u} \Lambda) + \vec{u} S_M + S_E, \quad (3)$$

где:

– тензор трения:

$$\Lambda = \mu \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^t - \frac{2}{3} \delta \nabla \vec{u} \right), \quad (4)$$

– полная энергия:

$$H = h + \frac{1}{2} \vec{u}^2. \quad (5)$$

В формулах (1)-(5) \vec{u} – векторное поле скоростей, τ – время, ∇ – векторный оператор Гамильтона, ∇^2 – векторный оператор Лапласа, \otimes – оператор тензорного произведения, δ – дельта функция Кронекера, μ – динамическая вязкость, ρ – плотность, p – давление, λ – коэффициент теплопроводности, q_i – тепловой поток от внутренних источников тепловой энергии, t – температура, h – энтальпия, S_M – точечные источники импульса, S_E – точечные источники энергии.

Геометрия модели описывает собой участок тоннеля длиной 6,7 км и участок выхода из тоннеля с прилегающей наружной атмосферой. Задача решена в 2D-постановке. Геометрические параметры расчетной модели и краевые условия приведены на рис. 1.

Гидравлический диаметр поезда принят 3,77 м, длина 1100 м. Поезд начиная с начального времени 0 с равномерно разгоняется до скорости $v=19,45$ м/с на участке пути 100 м, затем движется со скоростью 19,45 м/с.

В качестве начальных условий заданы: – в тоннеле температура воздуха $t=+4^\circ\text{C}$ и расход воздуха $L_{нач}=56,3$ м³/с, – температура наружного воздуха $t=-46^\circ\text{C}$.

В качестве граничных условий заданы: –расход воздуха на входном портале $L_{вх}=56,3$ м³/с, естественная температура грунта $t_{cm}=+4^\circ\text{C}$, – на свободной поверхности атмосферы наружная температура $t=-46^\circ\text{C}$ [3] и атмосферное давление.

Тепловой мощностью припортальных отопительных установок в данном вычислительном эксперименте пренебрегаем.

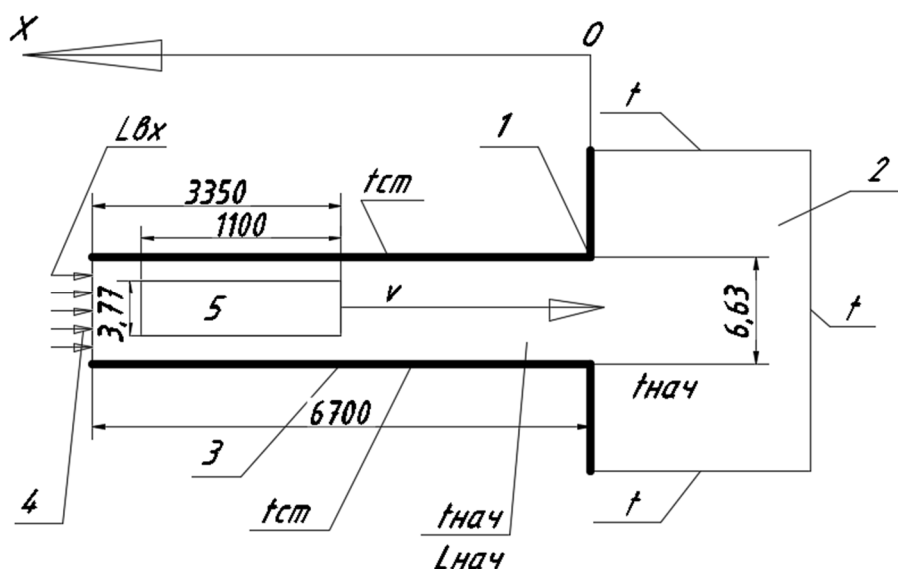


Рис. 1. Геометрические характеристики и краевые условия моделирования аэротермодинамических процессов в тоннеле при выходе поезда:

1 – выходной портал, 2 – наружная атмосфера, 3 – тоннель, 4 – входной портал, 5 – поезд, L_{vx} – установившийся попутный поток воздуха в тоннеле; v – скорость поезда; t_{cm} – естественная температура стенки в начальный момент времени; t – наружная температура воздуха; $t_{нач}$ и $L_{нач}$ – начальная температура воздуха и установившийся попутный расход воздуха в тоннеле

Задача решена в нестационарной постановке. Шаг по времени определен таким образом, чтобы критерий Куранта Ku в любой момент расчета был меньше 1. Общее время расчета составило 280 с, шаг по времени 0,1 с. Настройка препроцессора осуществлена в соответствии с рекомендациями [4-7].

Для верификации полученных данных протяженность зоны захлаживания, полученная в результате обработки данных вычислительного эксперимента, сопоставляется с протяженностью зоны захлаживания, определенной методом вытеснения. Определим скорость воздуха в зазоре U_3 , м/с, между стенкой тоннеля и габаритом поезда по формуле:

$$U_3 = U \frac{S_{поезд}}{S_{тон} - S_{поезд}} - \frac{L_{vx}}{S_{тон} - S_{поезд}}, \quad (1)$$

где U – скорость поезда 19,45 м/с; $S_{поезд}$ – площадь поперечного сечения поезда, равная 13,96 м²; $S_{тон}$ – площадь поперечного сечения тоннеля, равная 38,92 м²; L_{vx} – установившийся, попутный расход воздуха в тоннеле, инициируемый движением поездов по тоннелю, и зависящий от геометрических и технологических параметров тоннеля, а также от режима движения поездов по тоннелю. В данном исследовании принято $L_{vx} = 56,3$ м³/с.

Протяженность зоны захлаживания определится как:

$$l = v_3 \cdot \tau, \quad (2)$$

где τ – время прохождения поезда через выходной портал, с.

Результаты

На рис. 2 приведено распределение температуры в зоне контакта «наружный воздух – тоннельная обделка» на различном удалении от выходного портала тоннеля в момент выхода хвостового вагона поезда из тоннеля без учета работы припортальной отопительной установки. Выявлено, что на расстоянии уже 565 метров от выходного портала тоннеля температура остается положительной, что принято за границу зоны захлаживания.



Рис. 2. Распределение температуры в зоне контакта «воздух-тоннельная обделка» на различном удалении от выходного портала тоннеля в момент выхода хвостового вагона поезда из тоннеля без учета работы припортальной отопительной установки:

1 – зона захлаживания обделки, 0 м по оси абсцисс – выходной портал тоннеля

Для проверки результатов вычислительного эксперимента определим длину участка тоннеля около выходного портала, подверженного влиянию отрицательных температур, методом вытеснения. Скорость воздуха в зазоре, определенная по формуле 1, составит 8,62 м/с. Следовательно, время прохождения поезда через выходной портал составляет 57 с. Тогда длина зоны около выходного портала с отрицательной температурой воздуха составит 491 м. невязка с результатами вычислительного моделирования $(565-491) \cdot 100\% / 565 = 13\%$, что до-

статочно близко к результату вычислительного моделирования и подтверждает адекватность полученных результатов.

Аналогичные исследования проведены для температуры наружного воздуха минус 33°C и скорости поезда 40 км/ч (рис. 3).



Рис. 3. Распределение температуры в зоне контакта «воздух-тоннельная обделка» на различном удалении от выходного портала тоннеля в момент выхода хвостового вагона поезда из тоннеля без учета работы припортальной отопительной установки для различных температур наружного воздуха t_{ext} и скорости движения состава v :

- 1 – $t_{ext} = -33^{\circ}\text{C}$ и $v = 70$ км/ч; 2 – $t_{ext} = -46^{\circ}\text{C}$ и $v = 40$ км/ч; 3 – $t_{ext} = -33^{\circ}\text{C}$ и $v = 40$ км/ч;
4 – $t_{ext} = -46^{\circ}\text{C}$ и $v = 70$ км/ч

Обсуждение

Как видно из рис. 3, зона распространения холодного воздуха вглубь тоннеля при прохождении составом выходного портала составляет не более 550 м при скорости состава не выше 70 км/ч при принятых значениях скорости поезда, площади его поперечного сечения и площади поперечного сечения тоннеля. При отличном от принятого в данной работе соотношения площадей поперечных сечений поезда и тоннеля протяженность распространения холодного воздуха вглубь тоннеля будет отличаться. Поэтому исследование длины зоны захлаживания тоннельной обделки вглубь тоннеля и температуры тоннельной обделки в зоне контакта «наружный воздух – тоннельная обделка» для различных соотношений площадей поперечных сечений поезда и тоннеля является перспективным направлением по продолжению данной работы.

Также авторы отмечают, что скорость прохождения состава не влияет на протяженность зоны захлаживания только при частном случае, когда в тонне-

ле отсутствует установившийся попутный поток воздуха. Это прослеживается из соотношений 1 и 2. Чем больше скорость поезда, и, соответственно, скорость воздуха в зазоре, тем меньше время прохождения поезда через портал. К аналогичному выводу утверждению, но применительно к подземным тоннелям метрополитена мелкого заложения, пришел коллектив авторов в работе [8]. Однако при наличии установившейся величины расхода воздуха через тоннель, длина зоны захлаживания для различных скоростей движения воздуха не является постоянной, что показано на рисунке 3.

Заключение

В работе обоснована протяженность зоны захлаживания обделки от выходного портала вглубь тоннеля и выявлены закономерности изменения температур тоннельной обделки в зоне контакта «наружный воздух – тоннельная обделка» от выходного портала вглубь тоннеля в зависимости от технологических параметров эксплуатации и климатических условий тоннеля при движении поездов.

Благодарности

Данная статья написана по результатам исследований, приведенных в рамках проекта ФНИ, номер гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лугин И.В., Витченко А.А. Поддержание требуемого температурного режима в северо-муйском тоннеле в холодный период года средствами тоннельной вентиляции / И.В. Лугин, А.А. Витченко // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук.* – Новосибирск : ИГД СО РАН, 2014. – т. 1. – № 1. – с. 210-214.
2. Лугин И.В., Алферова Е.Л. Исследование аэродинамических процессов при движении поезда в протяженных железнодорожных тоннелях / И.В. Лугин, Е.Л. Алферова // *Интерэкспо Гео-сибирь.* – Новосибирск, 2018. – 2018. – т.5. – С. 155 – 160.
3. СП 131.13330.2018. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* [Текст] : утв. Приказом Минстрой и ком.хоз. РФ 28.11.2018 : дата введ. 29.05.2019. – М.: [б.и.], 2019. – 115 с.
4. Батурин О.В. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent. Учеб. Пособие / О.В. Батурин, Н.В. Батурин, В.Н. Матвеев – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.: ил.
5. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.: ил.
6. ANSYS. Customer Training Material. Introduction to ANSYS Meshing.
7. Ansys CFX User's Help. Version 2019R3.
8. Krasnyuk A.M., Lugin I.V., Pavlov S.A. Experimental research into air distribution in a terminal subway station// *Tunnelling and Underground Space Technology.* Volume 85, March 2019, Pages 21–28.

© Л. А. Кияница, И. В. Лугин, 2020