

ON THE VENTILATION OF TRANSPORT TUNNELS IN THE PRESENCE OF A STRONG (HEAVY) FIRE

**OMAR LANCHAVA¹, NICOLAE ILIAS², IOSIF ANDRAS³, ROLAND
MORARU⁴, IOAN NEAG⁵**

Abstract: The paper deals with a comparative assessment of the different variants of tunnel ventilation systems in case of strong (heavy) fires. The longitudinal, the transversal and combined ventilation systems are presented and analyzed. It is concluded that the most sure systems are the transversal and combined ones, because always exists separate channels for clean air and anytime the air flow can be adjusted using fans.

Keywords: transport tunnels, tunnel fires, ventilation, safety

К ВОПРОСУ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОГО ПОЖАРА

Считая весьма дискуссионным вопрос о надежности по пожарной безопасности даже поперечных, т.е. самых лучших в этом отношении систем вентиляции, предварительно заметим, что для эвакуации людей пригодны не все комбинированные системы проветривания, а лишь поперечно-продольная, и только в том случае, если имеется возможность перевода людей в канале со свежей струей. Для продольно-поперечной системы в обычном режиме работы в вентиляционном канале имеется загрязненный воздух. Поэтому даже при технической возможности перевода людей в этом канале, это мероприятие все равно лишено смысла, поскольку необходимо до этого ожидать “наполнения” канала свежим воздухом. Учитывая относительные скорости транспортных средств и воздушного потока, а также инерционность реверса из-за

¹ Ph.D. Eng., Professor, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia

² Ph.D. Eng., Professor, University of Petroșani, Petroșani, Romania

³ Ph.D. Eng., Professor, University of Petroșani, Petroșani, Romania

⁴ Ph.D. Eng., Professor, University of Petroșani, Petroșani, Romania

⁵ Ph.D. Eng, Assoc. Professor, University of Petroșani, Petroșani, Romania

сопротивления движущегося воздуха, более реалистично удаляться из пожарной обстановки на своем или другом транспорте, чем ожидать результаты реверсирования.

Но вся суть в том, что в случае сильного пожара, рециркуляция воздушного потока вовсе не осуществимо.

Совершенно очевидно, что однтоннельные комбинированные системы не имеют преимущества перед продольными не в вопросе эвакуации людей и не в вопросе тушения пожаров. Следовательно, их применяют в обычном режиме проветривания и несут большие затраты только потому, что ожидают положительного проявления системы во время пожара.

Рассмотрим конкретную продольно-поперечную систему вентиляции: свежий воздух поступает через порталы левого и правого крыла (рис. 1), а загрязненный отсасывается порталными вентиляторами через окна в фальшпотолке над транспортной зоной. Всего имеется 40 окон на левом и 40 окон на правом крыле с регулируемой площадью сечения и, следовательно, с регулируемым аэродинамическим сопротивлением.

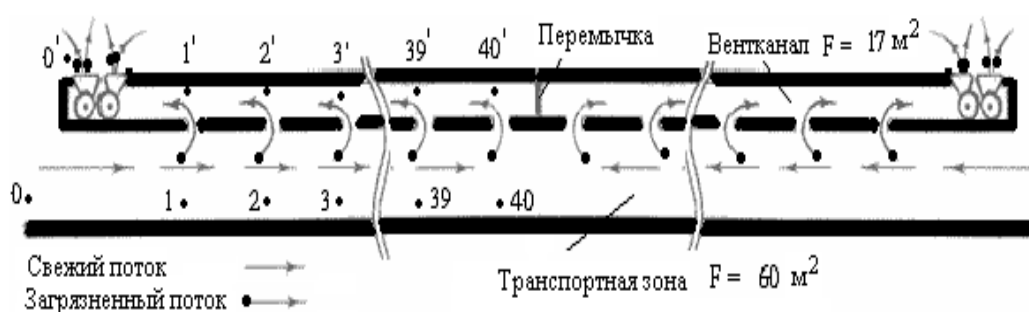


Рис. 1. Продольно-поперечная система вентиляции в нормальном режиме работы

Первое окно имеет в любом случае наибольшее сопротивление таким расчетом, что суммарные депрессии всех участков равны согласно основного закона параллельных ветвей. Т.е.

$$H_{0-1-01'-0'} = H_{0-2-2'-0'} = H_{0-3-3'-0'} = \dots = H_{0-40-40'-0'}. \quad (1)$$

В центральной части вентканала имеется перемычка благодаря которой вся система разделена на две симметричные крыла. Через каждое окно вентиляторы отсасывают 1,25% от общего расхода воздуха.

Теперь рассмотрим принцип работы системы в условиях пожара, который и для нас был убедительным до получения результатов настоящей работы.

Допустим очаг пожара находится на левом крыле между окнами 2 и 3. В таком случае первый и все последующие окна (4, 5, и т.д.) на левом крыле автоматически закрываются, второе и третье окна открываются на максимальное сечение, а правое крыло продолжает работать в обычном режиме.

В результате на участке 3–40 левого крыла движение воздуха прекратится и следовательно, не будут распространяться продукты сгорания. На левом крыле воздух будет проходить только по маршрутам 0–2–2'–0' и 0–3–3'–0' вынося продукты сгорания в атмосферу. Во втором и в третьем окнах будет энергичный отсос воздуха, к чему будут способствовать другие закрытые окна и высокая температура воздуха. Здесь подразумевается, что система оповещения уже сработала, поступление транспорта в тоннели не происходит и все транспортные средства с тоннели движутся к порталам, односторонно. В течение 2-3 мин эвакуация транспорта закончится и система автоматически переходит в режиме тушения пожара (рис. 2).

Для этого правый портал автоматически закрывается железной дверью и вентиляторы правого крыла в тот же момент реверсируются. Отсос воздуха в этом случае будет производится только в окнах 2 и 3 и работу начнет пожарная служба, который к очагу подойдет с обеих сторон.

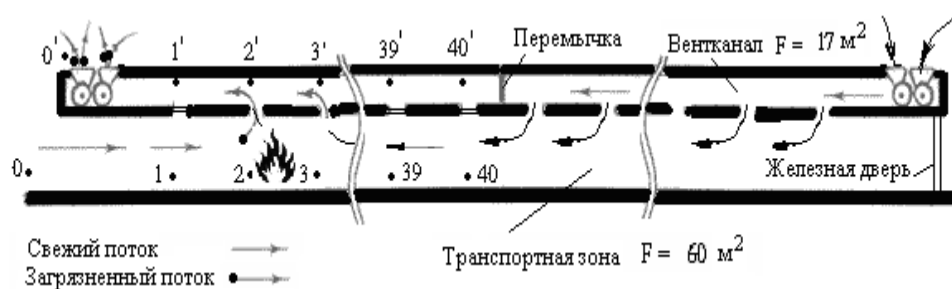


Рис. 2. Продольно-поперечная система вентиляции в режиме работы тушения пожара

Для этого правый портал автоматически закрывается железной дверью и вентиляторы правого крыла в тот же момент реверсируются. Отсос воздуха в этом случае будет производится только в окнах 2 и 3 и работу начнет пожарная служба, который к очагу подойдет с обеих сторон.

Заметим, что вышеотмеченное будет иметь место только в том случае, если напор вентиляторов подавляет пожарную тягу.

Допустим сила тяги пожара во многом превосходит напор вентиляторов. В таком случае пожар будет засасывать воздух не только с левого портала, но и через вентиляторных установок. Следовательно, вентиляторы будут работать на всасывание, а воздушный поток будет иметь противоположное направление и это будет продолжаться до выхода вентиляторов из строя. Таким образом, если мы хотим спасти хотя бы вентиляторы, должны надежно изолировать их от вентиляционной системы. В любом случае вентиляторы левого крыла уже не будут инициаторами направленного перемещения воздуха.

Легко догадаться, что воздушный поток с продуктами сгорания будет направляться к правому portalу. В таком случае проезжая и сводовая части

тоннели являются параллельными выработками и расход воздуха в них будет соответствовать закону, выраженной формулой

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{Q_2^2}{Q_1^2}, \quad (2)$$

где R_1 - суммарное аэродинамическое сопротивление вентканала, вентиляционных окон и вентиляторов, Н.м⁸/с²; R_2 - аэродинамическое сопротивление основной тоннели, Н.м⁸/с²; Q_1, Q_2 - объемные расходы воздуха в вентканале и в тоннели соответственно, м³/с.

Из этой формулы вытекает, что депрессии тоннеля и системы “вентканал - окна - вентиляторы” одинакова и равна депрессии пожарной тяги (депрессия вентилятора и пожара суммируется алгебраически), т.е.

$$R_1 Q_1^2 = R_2 Q_2^2. \quad (3)$$

Следовательно, направление воздушного потока будет противоположной показанного на рис. 2 и для правого крыла, а через вентканал будет проходить меньшее количество воздуха, чем в основном тоннеле. Однако, и этот расход будет достаточным для того, чтобы вывести из строя вентиляторы правого крыла. Таким образом, спасение этих вентиляторов возможно лишь их изоляцией и исключением от вентиляционной системы.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать предварительное заключение, что если очаг пожара возбudit большее динамическое давление, чем статический напор вентиляторов, однитоннельная комбинированная система вентиляции автоматически переходит в более естественную продольную систему и целесообразность применения комбинированной системы без осмысления можно поставить под сомнение.

Теперь покажем ориентировочную величину пожарной тяги. В случае надежного определения давления воздуха в очаге пожара, можно рассчитывать депрессию с помощью уравнения Бернулли между двумя сечениями (1 и 2) тоннели, для которых скорость воздушного потока (U_1, U_2), высота от уровня моря (z_1, z_2) и плотность воздуха (ρ_1) являются постоянными. Т.е.

$$h = P_1 - P_2 = \int_1^2 dh, \quad (4)$$

где h депрессия, вызванная наличием пожара, кПа; P_1, P_2 - соответственно давление воздуха в сечениях 1 и 2. Сечение 1 совпадает с порталом, а 2 с очагом пожара. В таком случае P_1 является атмосферным давлением, а P_2 давлением, обусловленным наличием пожара.

Воспользуемся статистическими данными о случившихся пожарах в транспортных тоннелях. 1979 году в автодорожном тоннеле Ниходзака (между городами Токио и Нагоя, длина тоннеля около 2 км) в 400 метрах от портала произошел пожар, во время которого температура была 1000°C на участке тоннеля длиной до 1122 м. Температура также достигала 1000°C во время пожара в Монреальском метро (Канада) [1]. 1984 году во время пожара в Саммитском тоннеле (Великобритания) загорелась цистерна нефти емкостью 100 т, а температура в очаге достигала 1500°C [2].

Продукты сгорания подчиняются общим закономерностям термодинамики и согласно уравнения Клапейрона для идеальных газов можно определить давление на очаге пожара при известной температуре

$$Pv = RT, \quad (5)$$

где P давление воздуха, кПа; v - удельный объем воздуха ($v\rho = 1$, $v = 1/\rho$), $\text{м}^3/\text{кг}$; ρ - плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; R - удельная постоянная воздуха, $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T - абсолютная температура, К .

Расчет, конструирование и испытание вентиляторов производится для стандартной плотности воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$, который получается уравнением Клапейрона для атмосферного давления воздуха на уровне моря $P = 1,02 \times 10^5 \text{ Па}$ при температуре 20°C . Таким образом, апробированная технология вентиляторостроения принимает воздух в качестве идеального газа. Можно на этом обосновываться и произвести хотя бы приближенный расчет давления воздуха в очаге пожара. Однако имеются данные, которые свидетельствуют, что с помощью уравнения (5) можно получать достаточно верные результаты.

Дело в том, что в камере артиллерийского оружия уравнение Клапейрона при давлениях $P = (2100 - 4600) \times 10^5 \text{ Па}$ дает погрешность в диапазоне 8-12,5% [3]. Следовательно, для атмосферного давления этим уравнением можно свободно пользоваться.

Предполагаем, что в очаге пожара плотность воздуха изменяется незначительно, так как в нем поступают тяжелые продукты сгорания и сравнительно легкие пары воды [4], которые компенсируют друг друга. Существенное увеличение плотности воздуха может быть результатом значительного возрастания статического давления, что не имеет место в тоннелях, т.к. допущение этого означает образование сильного разрежения на другом месте и самотушение пожара, что не встречается в природе. Следовательно, весь прирост давления будет за счет динамического составляющего. Отсюда следует вывод, что величина удельного объема воздуха v не выходит за пределы ошибки измерения, либо определения.

Исходя из вышеизложенного, температура 1000°C , согласно формулы (5), может вызвать динамическое давление около 447,6 кПа, что примерно 30-раз

больше статического напора самых мощных шахтных вентиляторов. Следовательно, направление движения воздуха и его расход в случае сильного пожара уже не определяется вентиляторами и подтвердилось наше предварительное заключение.

Очевидно, что мощность пожара зависит от массы топлива, который определенным образом связан с суммарной массой продуктов сгорания и вентиляционного воздуха m . С умножением на эту величину формула (5) принимает вид

$$PV = mRT \quad (6)$$

где $V = mv$ объем воздуха, который участвует в процессе горения, m^3 . Отмеченный объем можно выразить через формулу

$$dV = SdU \quad (7)$$

где S площадь поперечного сечения тоннели, m^2 , $S = const$; dU - приращение скорости, который зависит от силы пожара, m/c .

Полагаем, что в тоннелях с длиной до 2-х км, во избежание несчастных случаев, эвакуация людей и транспортных средств должен закончиться в 2-х минутах, исходя из скорости транспорта и из экспериментальных данных, которые свидетельствуют, что продуктами горения сечение тоннеля наполняется через 5-6 минут [5]. Следовательно, мы можем дать интервал времени в секундах $0 \leq \tau \leq 120$, а формула (7) принимает вид

$$V = S \int_0^{120} [U_0 + U(\tau)] d\tau \quad (8)$$

где U_0 начальная скорость воздушного потока, m/c , $0,1 \leq U_0 \leq 6$; $U(\tau)$ - скорость воздуха, который представлен в виде функции времени, m/c .

Скорость воздушного потока влиянием пожарной тяги увеличивается с течением времени и при допущении неограниченного количества разлитого по тоннели топлива для конкретного тоннеля достигает определенного максимума. Следовательно, подинтегральная функция является сложной и неизвестной функцией. Поэтому для определения ориентировочной массы топлива (горючего материала), который способен опрокинуть вентиляторы, воспользуемся величиной скорости воздушного потока, наблюдавшийся в тоннелях во время пожара. Этот скорость составляет 15-20 m/c [5].

Безусловно, что отмеченная скорость не является конечной скоростью в тоннелях и ее достижение потоком отнюдь не носит линейный характер. Однако, не имея другого выбора мы линеаризировали отмеченную скорость в интервале времени $0 \leq \tau \leq 120$ и вычислили значения функции $U(\tau)$ для временных моментов $\tau_0 = 0$, $\tau_1 = 12$, ..., $\tau_9 = 108$, $\tau_{10} = 120$. Соответствующие значения

функции следующие: $f(0) = 1,5$, $f(\tau_1) = 3,35$, $f(\tau_2) = 5,20$, $f(\tau_3) = 7,05$, $f(\tau_4) = 8,90$, $f(\tau_5) = 10,75$, $f(\tau_6) = 12,60$, $f(\tau_7) = 14,45$, $f(\tau_8) = 16,30$, $f(\tau_9) = 18,15$, $f(\tau_{10}) = 20,0$. Затем по формуле трапеции получается

$$V \approx S \frac{120-0}{20} [f(0) + 2f(\tau_1) + \dots + 2f(\tau_9) + f(\tau_{10})] = 12900S.$$

Для сечения $S = 25$ м², что соответствует автодорожному тоннелю с односторонним движением, по формуле (8) получается, что $V = 322500$ м³.

С помощью формулы (8) получается формула, показывающая давление на очаге пожара с учетом массы продуктов сгорания и следовательно, по какой-то зависимости, массы топлива

$$P_2 = \frac{mRT}{S \int_0^{120} [U_0 + U(\tau)] d\tau}. \quad (9)$$

Известно, что для сжигания 1 м³ паров бензина при плотности 0,73 кг/м³ требуется 58,80 м³ воздуха [7]. График зависимости компонентов горения “масса бензина - объем воздуха” приведен на рис. 3.

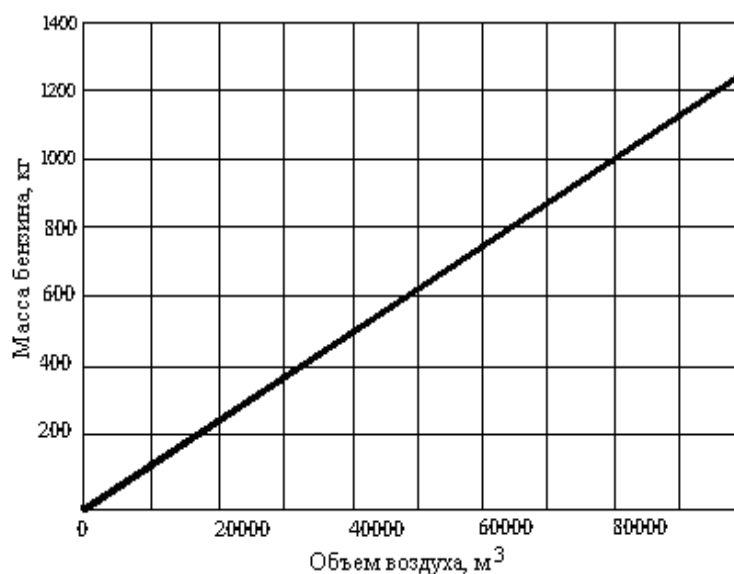


Рис. 3. График зависимости “масса бензина - объем воздуха”

Согласно приведенных данных, для получения продуктов сгорания в объеме 322500 м³ необходимо около 4000 кг ($322500 \times 0,73 / 58,8 = 4003,8$) бензина, или эквивалентного горючего материала. По формуле (9) сжигание такого количества бензина возбudit динамическое давление около 365 кПа,

которое способно подавить статическое давление любых вентиляторов. Что же касается коллапса тоннельных вентиляторов, то его вызовет горение примерно 150-300 кг бензина, или эквивалентного горючего материала.

Приведенный расчет носит приближенный характер, который не только не исключает, но и подразумевает новые исследования с целью осмысления систем вентиляции согласно новых данных и требований. Подразумеваем Физическое и математическое моделирование процесса горения и исследование его влияния на вентиляторные установки. Однако, на основе приведенного материала уже можно сделать заключение, что при решении вопросов эвакуации транспортных средств и людей, а также ликвидации пожара и минимизации его отрицательных действий, на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации вентиляционной системы транспортных тоннелей следует учитывать влияние пожарной тяги.

Литература

- [1]. **Т.К. Чурадзе.** Статистика особых условий в транспортных тоннелях. Транспорт №2, 2004, Грузинский технический университет (ГТУ), Тбилиси, 11-13 с. (На Грузинском языке).
- [2]. *Tunnels and Tunneling.* 1988, №7, pp. 29-30.
- [3]. **М.Е. Серебряков.** Внутренняя баллистика. Москва, Оборонгиз, 1949, 670 с.
- [4]. **О.А. Ланчава.** Гигроскопический тепломассообмен в подземных сооружениях. Тбилиси, ГТУ, 1998, 272 с. (На Грузинском языке).
- [5]. **Kumar S.** Fire Development and Smoke Spread in Tunnels-Some Modeling Considerations. Safety in road and rail Tunnels, First International Conference Basel, Switzerland, 23-25 November 1992, pp. 379-394.
- [6]. **А.И. Буадзе, А.И. Габрашвили, Д.Х. Цвениашвили.** Математика для инженеров, 2 часть, Тбилиси, ТГУ, 1986, 502 с.
- [7]. **А.Т. Айруни.** Теория и практика борьбы с рудничными газами на больших глубинах. Москва, Недра, 1981, 335 с.