

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ЕСТЕСТВЕНАТА И МЕХАНИЧНА ВЕНТИЛАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕН ТУНЕЛ

**Елена Власева, Захари Динчев**

*Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София, elena@mgu.bg; zdinchev@gmail.com*

**РЕЗЮМЕ.** За вентилация на транспортни тунели често се прилага надлъжна схема на проветряване. При тази схема метеорологичните фактори при порталите оказват влияние за естественото генериране на въздушни течения. Посоката и големината на тези течения зависят от няколко фактора, които ги променят денонощно и/или сезонно. Преодоляване на тази променливост се постига с изграждане на механична вентилация, в разчетите на която следва да се отчете участието на естествените течения. Статията разглежда типични конфигурации за изчисляване и оценяване на посоката и големината на генерираните течения при съпосочност или противоположност на трафика, естествената и механична вентилация. Показани са идеи за оптимизиране на разходите за механична вентилация при съблюдаване на факторите на окръжаващата среда.

**Ключови думи:** вентилация на транспортни тунели; естествено проветряване; механична вентилация, butalen efekt

### NATURAL AND MECHANICAL VENTILATION INTERACTION IN ROAD TUNNELS

**Elena Vlasseva, Zahari Dinchev**

*University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia, elena@mgu.bg; zdinchev@gmail.com*

**ABSTRACT.** For road tunnel ventilation often is applied longitudinal scheme. It imposes significant influence of meteorological factors around tunnel portals which lead to naturally generated flows. Their direction and amount change seasonably or/and daily. Due to this variability natural ventilation need to be combined with mechanical one. Its design should take into account natural condition in order to be more effective. This paper presents typical configurations for calculation and evaluation of generated flows, assuming unidirectional and opposite directions between traffic, natural and mechanical ventilation. Some ideas for expenses for ventilation optimization under different ambient conditions are shown.

**Key words:** road tunnels ventilation, natural ventilation, mechanical ventilation, piston effect

### Въведение

Вентилацията на транспортните тунели е важна част от безопасната експлоатация на тези съоръжения. Схемите по които може да се осъществи тази дейност са различни (Власева, 2014, Норми за проектиране 2014). Една от най-често прилаганите схеми (предимно за тунели с дължина до 3-4 km) е надлъжната. При една от нейните конфигурации въздухът постъпва през единия портал, придвижва се по дължината чрез струйни вентилатори и се отделя или през другия портал или през специално изградени вентилационни съоръжения (вертикални, наклонени или хоризонтални изработки). Тази схема на проветряване се влияе от метеорологичните условия извън тунела. Сезонно или денонощно тези условия се променят и са в зависимост от микроклиматичните условия в тунела, върху които от друга страна влияят транспортния поток и отделените от превозните средства вредности. В резултат от всички тези явления могат да се получат взаимно влияещи си течения, обусловено от:

- Естествената тяга от разлики в температурата на въздуха извън и вътре в тунела;
- Бутален ефект от движението на транспортните средства;
- Механична вентилация, организирана за изнасянето на отделените в тунела вредности.

Естествената тяга и буталният ефект са с променливи параметри по големина и посока, докато механичната вентилация може да се контролира и по посока и по големина.

Може да се наблюдават следните случаи:

- Естествената тяга съвпада с посоката на трафика, но механичната вентилация е в обратна посока (напр. двупосочни тунели);
- Естествената тяга и механичната вентилация са съпосочни, но трафика е в обратната посока;
- Буталният ефект и механичната вентилация са с една посока, а естествената тяга е противоположна.

Анализираните по-горе случаи са представени в доклада. Размера и взаимодействието между явленията е демонстрирано с примерни изчисления. Направени са важни изводи и препоръки за осигуряване на нормална атмосфера в тунела с по-малки разходи.

### Основни зависимости

Включват определяне на естествени течения от денивелация между порталите, температурни разлики, влияние на вятъра, бутален ефект, както и параметрите на

механичната вентилация загуби на налягане от триене, напор и дебит за монтирани мощности. Тези течения се определят чрез определяне на разлики в налягането, предизвикани от различни фактори, както следва:

- От разликите в температурите (плътностите) на въздуха

$$P_t = \Delta \rho g \Delta H, \text{Pa} \quad (1)$$

$$\Delta \rho = (\rho_{out} - \rho_{in}), \text{kg/m}^3$$

$P_t$  – естествена тяга в резултат на разликите в температурите (плътностите) на въздуха, Pa

$\rho_{out}$  – плътност на въздуха извън тунела,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_{in}$  – средна плътност на въздуха в тунела,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\Delta H$  – разлика на геодезичните височини между двата портала, m

- От вятъра при входа/изхода на тунела

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{out} U_w^2 \cos^2(\beta) \text{sign}(\cos(\beta)), \text{Pa} \quad (2)$$

$P_w$  – естествена тяга от действието на вятъра при поратлите, Pa

$U_w$  – скорост на вятъра, m/s

$\beta$  – ъгъл между вектора на скоростта на вятъра и оста на тунела, deg

- От разлика в барометричното налягане между порталите

$$P_{Bar} = P_1 - P_2 \quad (3)$$

$P_1$  – Атмосферно налягане на първия портал на тунела, Pa

$P_2$  – Атмосферно налягане на втория портал на тунела, Pa

- Бутален ефект от движещи се превозни средства  
А) Съпосочно движение на превозни средства в тунела и въздушния поток (Road tunnel, 2004):

$$P_{piston}^{(+)} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{in}}{S_t} (N_{pc} S_{pc} if_{pc} + N_{hv} S_{hv} if_{hv}) (V_v - V_t)^2 \quad (4a)$$

Б) Насрещно движение на превозни средства в тунела спрямо въздушния поток:

$$P_{piston}^{(-)} = \frac{1}{2} \frac{\rho_{in}}{S_t} (N_{pc} S_{pc} if_{pc} + N_{hg} S_{hg} if_{hg}) (V_v + V_t)^2 \quad (4b)$$

където:

$N_{pc}$  – брой леки автомобили, %/100;

$N_{hg}$  – брой товарни и лекотоварни автомобили, %/100;

$S_{pc}$  – площ на обтичане на лек автомобил,  $\text{m}^2$ ;

$S_{hg}$  – площ на обтичане на товарен автомобил,  $\text{m}^2$ ;

$if_{pc}$  – коефициент на обтичане за лек автомобил, -

$if_{hg}$  – коефициент на обтичане за товарен автомобил, -

$V_v$  – скорост на движение на автомобилите, m/s;

$V_t$  – скорост на въздушното течение в тунела, m/s;

$S_t$  – напречно сечение на тунела,  $\text{m}^2$

Скоростта на въздушното течение в тунела  $V_t$ , респективно вентилационния дебит, се определя от изчисленията за необходими и достатъчни количества въздух за поддържане на безопасна среда в тунела и изнасяне на отделените в него вредности (Власева Е., 2014). Тази стойност се използва и във формулите, записани по-нататък в текста.

- Загуба на налягане от триене при движение на въздуха в тунела – местни и линейни съпротивления:

$$P_{fr} = \left( \lambda \frac{L}{D_e} + \xi + 1 \right) \rho_{in} V_t^2, \text{Pa} \quad (5)$$

$L$  – дължина на тунела, m

$D_e$  – еквивалентен диаметър на тунела, m

$\lambda$  – безразмерен коефициент на триене

$\xi$  – сумарен коефициент на местните съпротивления (вход, изход, завой и др);

Друга важна характеристика, свързана с осъществяване на надлъжна вентилация е депресията, която създава един струен вентилатор. Определяне на този параметър може да се извърши по няколко зависимости (6, 6а, 6б). В тях участват фабричните характеристики на струен вентилатор, а именно:

- Енергия (тласък, тяга) –  $S_{st}$  (статична), N
- Мощност  $N_{JF}$ , kW
- Скорост на изтичане на струята  $V_{JF}$ , m/s;
- Обемен дебит  $Q_{JF}$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;
- Инсталационен фактор  $k_{JF} \in (0.85 \div 0.95)$  в зависимост от начина на монтаж на вентилатора
- Диаметър на корпуса на струйния вентилатор  $d$ , mm;
- $S_{JF}$ ,  $\text{m}^2$  площ на изходящия отвор на струйния вентилатор.

- Налягане, създавано от струен вентилатор  $\Delta P_{JF}$ , Pa

$$\Delta P_{JF} = \frac{k_{JF}}{S_t} \left( 1 - \frac{V_t}{V_{JF}} \right) S_{st}, \text{Pa} \quad (6)$$

$$\Delta P_{JF} = k_{JF} \frac{\rho_{in} Q_{JF} V_{JF}}{S_t} \left( 1 - \frac{V_t}{V_{JF}} \right) \quad (6a)$$

$$\Delta P_{JF} = k_{JF} \rho_{in} (V_{JF} - V_t) V_{JF} \frac{S_{JF}}{S_t} \quad (6b)$$

По зависимости (6) – (6б) се получават аналогични резултати. Записани са и трите израза за пълнота на изложението, защото се срещат в различни литературни източници (O'Gorman et al 2012, Jacques E. et al. 1999).

По зависимости (1, 2 и 3) се определя т.н. естествена тяга, по зависимости (4а и 4б) – буталния ефект от

движението на транспортните средства, по (5) – загубата на налягане от триене, която трябва да се преодолее или от естествената тяга или/и от механичната вентилация.

## Взаимодействие между естествената и механична тяга

Естествената тяга е променлива по посока и големина при променливи външни (метеорологични) фактори и микроклиматични условия в тунела. Общата величина на естествената тяга може да се запише като:

$$P_{nat} = \pm P_t \pm P_w \pm P_{bar} \quad (7)$$

В зависимост от желаната посока на вентилационния поток стойността на естествената тяга може да е с отрицателен знак, т.е. да действа срещу течението, което проектантът желае да осъществи.

Депресията в тунела ( $\Delta P_{tu}$ ) трябва да преодолява загубите на налягане от триене и да отчита влиянието на естествените фактори. Загубата на налягане от триене е винаги с положителен знак, докато останалите параметри са с променлив знак:

$$\Delta P_{tu} = P_{fr} \pm P_t \pm P_w \pm P_{piston} \quad (8)$$

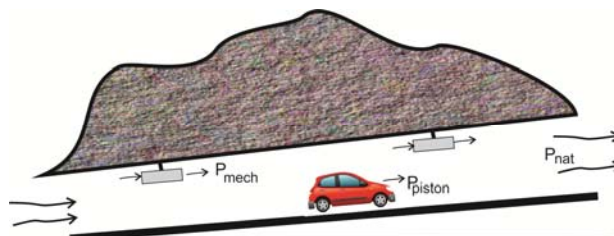
Ако естествена тяга е противоположна по посока с проектираната вентилация създадената депресия в тунела трябва да я преодолее. Това означава че в общия баланс за ( $\Delta P_{tu}$ ) естествената тяга е с положителен знак.

Стойността на ( $\Delta P_{tu}$ ) е по-голяма и следва да се предвидят по-големи мощности за механична вентилация за да се постигнат желаните резултати. При съпосочна естествена тяга допълнителните мощности може да са по-малки. Балансът на взаимодействието между влиянието на естествените фактори и резултантната депресия се получава от следните течения:

- Течение от естествена тяга ( $P_{nat}$ );
- Течение от буталния ефект на трафика ( $P_{piston}$ );
- Необходима посока на въздушното течение ( $P_{mech}$ ), определена при избора на схема за проветряване (Власева, Е.В., 2014; Норми за проектиране на пътни тунели, 2014).

Тези три течения може да са съпосочни, но може и някои от тях да са с противоположно направление, особено спрямо желаната посока, определена по проекта за вентилация ( $P_{mech}$ ). Последователно са представени зависимостите при различните конфигурации на тези течения.

- *Резултантно налягане за проветряване на тунела при съпосочно движение на теченията (фиг.1):*

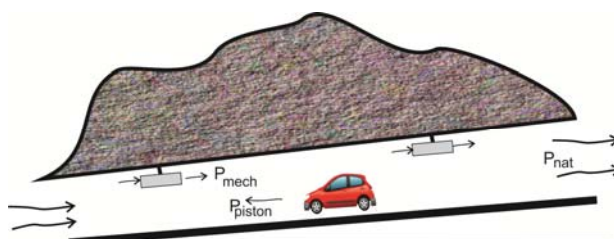


Фиг.1. Съпосочно движение (трафик, естествена тяга, възходящо проветряване)

Съпосочността на теченията подпомага работата на механична вентилация. Резултантната депресия се получава от загубите от триене, намалена с буталния ефект и естествената тяга:

$$\Delta P_{tu} = P_{fr} - P_{nat} - P_{piston}^{(+)}, Pa \quad (9a)$$

- *Необходимо налягане за проветряване на тунела при насрещно движение на трафика спрямо въздуха (фиг.2):*



Фиг.2. Противоположно движение трафик - естествена тяга при възходящо проветряване

При този случай противоположността на трафика създава допълнително затруднение за реализиране на общата депресия на тунела ( $\Delta P_{tu}$ ) и затова се прибавя в баланса:

$$\Delta P_{tu} = P_{fr} - P_{nat} + P_{piston}^{(-)}, Pa \quad (9b)$$

Балансовото налягане при двупътен тунел се отчита по зависимост (9в):

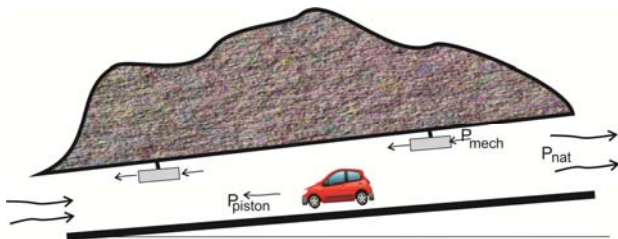
$$\Delta P_{tu} = P_{fr} - P_t \pm P_{w1} \mp P_{w2} - P_{piston}^{(+)} + P_{piston}^{(-)}, Pa \quad (9в)$$

където:  $P_{w1}$  е налягането от вятъра при единия портал;

$P_{w2}$  е налягането от вятъра при другия портал;

Какъв знак да се вземе при порталите зависи от конкретните условия.

- *Резултантно налягане при низходящо проветряване (естествена тяга противоположна по посока с трафика и механичната вентилация) (фиг.3)*

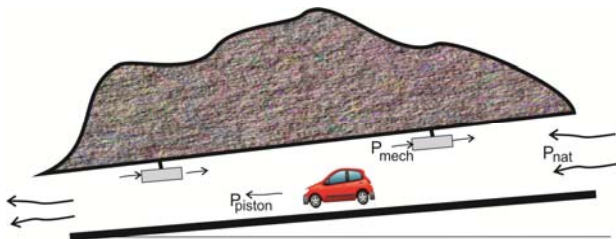


Фиг.3. Противоположно движение трафик - естествена тяга при низходящо проветряване

При този случай противоположността на естествената тяга създава допълнително затруднение за реализиране на общата депресия на тунела ( $\Delta P_{tu}$ ) и затова се прибавя в баланса, а съпосочния с механичната вентилация бутален ефект се изважда:

$$\Delta P_{tu} = P_{fr} + P_{nat} - P_{piston}^{(+)}, \text{ Pa} \quad (9г)$$

- Резултантно налягане при възходящо проветряване (естествена тяга и трафик противоположна по посока с механичната вентилация) (фиг.4)



Фиг.4. Възходящо проветряване – обратна естествена тяга и трафик

$$\Delta P_{tu} = P_{fr} + P_{nat} + P_{piston}^{(-)}, \text{ Pa} \quad (9д)$$

При този случай противоположността на естествената тяга създава допълнително затруднение за реализиране на общата депресия на тунела ( $\Delta P_{tu}$ ) и затова се прибавя в баланса, както и обратния на механичната вентилация трафик.

## Алгоритъм за определяне на вентилаторните мощности

Анализът на получените резултати за ( $\Delta P_{tu}$ ) довежда до следния алгоритъм за определяне на необходими вентилаторни мощности:

- Ако  $\Delta P_{tu} < 0$  то тунелът може да се проветрява без допълнителна механична тяга; естествените течения преодоляват загубите от триене и осигуряват проектно определената скорост респективно вентилационен дебит за осигуряване на безопасен микроклимат в тунела;
- Ако  $\Delta P_{tu} > 0$  то тунелът се нуждае от допълнителна механична тяга за преодоляване на загубите на налягане.

Допълнителната механична тяга за организиране на надлъжна вентилация със струйни вентилатори зависи от вида и параметрите на избраните вентилатори и от

депресията, която такъв вентилатор създава (зависимости 6, 6а, 6б). Броят струйни вентилатори, необходими за да преодолеят определената загуба на налягане  $\Delta P_{tu}$  и да осигурят проектните дебита се изчислява по зависимостта:

$$N_{JF} = \frac{\Delta P_{tu}}{\Delta P_{JF}} \quad (10)$$

където:

$N_{JF}$  е брой струйни вентилатори, всеки от които създава депресия  $\Delta P_{JF}$ .

Илюстрация на представените изчислителни зависимости, както и размера на генерираните налягания и течения са демонстрирани с примерни решения, показани в следващия параграф.

## Примерни решения

### Входни данни

Тунел с дължина  $L = 2000 \text{ m}$ , сечение  $S_t = 67,5 \text{ m}^2$  и периметър  $\Gamma_t = 32 \text{ m}$  е с денивелация  $\Delta H = 20 \text{ m}$  и с наклон 1%. Трафика е 429 veh/day за всяка лента на тунела. Структурата на трафика е 71% леки автомобили ( $N_{PC} = 0,71$ ) и 29% тежкотоварни автомобили ( $N_{HGV} = 0,29$ ). Скоростта на вентилационното течение  $V_t$  е избрано за три особени случая:

- минимална скорост 1 m/s;
- критична скорост при пожар в тунела 3 m/s;
- максимална скорост 6 m/s.

Вентилационните изчисления са направени със струйни вентилатори TAS11,2 на немската фирма TLT-Turbo GmbH. Вентилаторите са реверсивни и са със следните характеристики (Табл.1):

Таблица 1. Данни за струйните вентилатори

Sst = 1400 N	$N_{JF} = 50 \text{ kW}$	
d = 1120 mm	$S_{JF} = 0,98 \text{ m}^2$	$L_{JF} = 1100 \text{ mm}$
$Q_{JF} = 33,9 \text{ m}^3/\text{s}$	$v_{JF} = 34,4 \text{ m/s}$	$k_{JF} = 0,9$

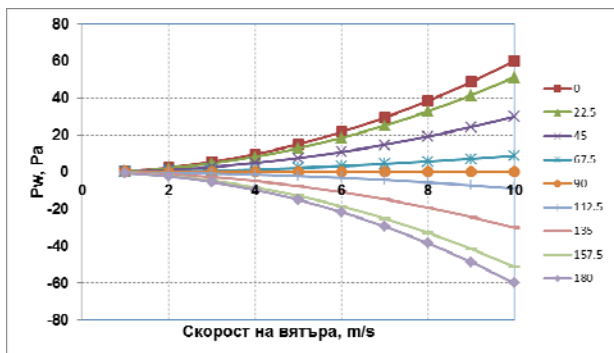
Изчисленията са направени за студен и топъл период, както и за двупосочно движение, което се налага при планов или аварийен ремонт на едната тунелна тръба. Данните са показани в табл.2.

Таблица 2. Температурни данни

Студен период	Топъл период
$t_{out} = 5^\circ \text{ C}; t_{in} = 15^\circ \text{ C};$	$t_{out} = 25^\circ \text{ C}; t_{in} = 15^\circ \text{ C};$
$\rho_{out} = 1,27 \text{ kg / m}^3;$	$\rho_{out} = 1,18 \text{ kg / m}^3;$
$\rho_{in} = 1,22 \text{ kg / m}^3;$	$\rho_{in} = 1,22 \text{ kg / m}^3;$
$P_{atm} = 978 \text{ hPa}$	$P_{atm} = 970 \text{ hPa}$

Обърнато е внимание на ориентацията на портала спрямо посоката и големината на ветровете. На фиг. 5 са показани нивата на генерираната ветрова тяга при скорости на вятъра от 1 до 10 m/s при различни ъгли

между оста на тунела (портала) и посоката на вятъра. Най-високи стойности се получават при съпосочност на ориентацията на портала и посоката на вятъра ( $\beta = 0^\circ$ ) - до 60 Pa и съответно най-ниски при противоположност на двете посоки ( $\beta = 180^\circ$ ). Този резултат е много показателен и обуславя необходимост от специализирани метеорологични измервания на местата на порталите за продължителен период, включващ топъл и студен сезон. Изчисленията са извършени с ъгъл  $45^\circ$  и вятър със скорост 3 m/s.



Фиг.5. Ветрова тяга при порталите при различни скорости на вятъра и ъгъл спрямо портала

### Студен период

Посоката на естествената тяга при студен период е с положителен знак, т.е. е от околната среда към вътрешността на тунела. Резултатите за необходимостта от механична вентилация и броя на струйните вентилатори при различните конфигурации на теченията (съпосочност и/или противоположност) са представени в табл.3.

Таблица 3. Резултати – студен период

	Vt = 1 m/s	Vt = 3 m/s	Vt = 6 m/s
	$\Delta P_{tu} < 0$ за всички скорости на трафика	$\Delta P_{tu} > 0$ само при трафик до 10 km/h	$\Delta P_{tu} > 0$ до 50 km/h $N_{JF} \in (2 \div 7)$
	$\Delta P_{tu} > 0$ $N_{JF} \in (4 \div 25)$	$\Delta P_{tu} > 0$ $N_{JF} \in (12 \div 32)$	$\Delta P_{tu} > 0$ $N_{JF} \in (35 \div 48)$
	$\Delta P_{tu} < 0$ за всички скорости на трафика	$\Delta P_{tu} > 0$ до 20 km/h $N_{JF} = 3$	$\Delta P_{tu} > 0$ до 60 km/h $N_{JF} \in (3 \div 8)$

Легенда: трафик механична вентилация естествена вентилация

Минимална скорост  $Vt = 1$  m/s сравнително лесно се реализира. При съпосочност на теченията на трафика и вентилацията, даже и при противоположна естествена тяга не се налага включване на струйни вентилатори. Когато обаче трафика е противоположен на желаната посока в зависимост от скоростта на трафика се налага включване на вентилатори в различни конфигурации. При по-ниските скорости на трафика броят е от 4 до 10, а при по-високите

достига до 25. При по-високите скорости на вентилационното течение (3 и 6 m/s) резултатите са доста по-различни. Даже и при съпосочност на трафика и вентилационното течение за скорости след 50 km/h се налага включване на вентилатори около 6-7 на брой. При противоположност на трафика и желаната посока на течението броят на вентилаторите за осигуряване както на критичната скорост, така и на максималната драстично се увеличава: 12 до 32 на брой при 3 m/s и 35 -48 при 6 m/s.

### Топъл период

Посоката на естествената тяга при топъл период е с отрицателен знак, т.е. е от вътрешността на тунела към околната среда низходящо (фиг.4.) Резултатите за необходимостта от механична вентилация и броят на струйните вентилатори при различните конфигурации на теченията (съпосочност и/или противоположност) са представени в табл.4.

Таблица 4. Резултати –топъл период

	Vt = 1 m/s	Vt = 3 m/s	Vt = 6 m/s
	$\Delta P_{tu} < 0$ При всички скорости на трафика	$\Delta P_{tu} > 0$ само при трафик до 20 km/h	$\Delta P_{tu} > 0$ до 50 km/h $N_{JF} \in (3 \div 7)$
	$\Delta P_{tu} > 0$ $N_{JF} \in (5 \div 26)$	$\Delta P_{tu} > 0$ $N_{JF} \in (13 \div 33)$	$\Delta P_{tu} > 0$ $N_{JF} \in (32 \div 49)$
	$\Delta P_{tu} < 0$ При всички скорости на трафика	$\Delta P_{tu} > 0$ до 20 km/h $N_{JF} = 1$	$\Delta P_{tu} > 0$ до 60 km/h $N_{JF} \in (2 \div 7)$

Легенда: посока на трафик механична вентилация естествена вентилация

Получените резултати са доста сходни с тези за студен период. В този случай естествената тяга определя низходящо течение, което е с обратна посока на възходящото вентилационно течение. Прави впечатление, че определящо при необходимостта от вентилационни мощности е противоположната посока трафик-основно течение. Това още веднъж потвърждава неписаното правило за съпосочност на трафика и вентилационното течение. Ако тунелът се състои от две тръби в едната трябва да се осъществи възходящо течение, а в другата – низходящо, за да се следва трафика. Остава открит въпросът за недопускане на рециркулация от едната тръба на тунела в другата.

### Заклучение

Анализът на получените резултати показва, че вентилацията на тунел е динамична система, особено когато зависи от атмосферните условия, какъвто е случаят с надлъжната вентилация със струйни вентилатори. С най-големи мощности се осигурява желаната посока на вентилационния въздух при насрещно движение на трафика. При двупосочно движение буталният ефект на

противоположно движещите се превозни средства се неутрализира до около 60 Pa и основно вентилационно течение е трудно да се осъществи със струйни вентилатори. Това означава, че при затваряне на едната тръба за ремонт и организиране на двупосочен трафик в другата тръба, трябва да се помисли за спомагателни вентилационни режими, които следва да се осигурят с други средства, а не със струйни вентилатори. Управление на вентилацията в зависимост от моделираните течения и включване на мощности при необходимост може да намали съществено разходите за електроенергия.

## Литература

Власева, Е.В. Схеми за проветряване на автотунели// Годишник на МГУ, Том 57, Св.ІІ, 2014, стр. 53-58.  
Власева, Е. *Оразмеряване вентилацията на тунел*, Сборник с доклади, Четвърта национална научна

конференция с международно участие, Девин, 23-26 септ. 2014, с. 233, ISBN 1314-7056.

Власева, Е. и др., Норми за проектиране на пътни тунели, гл. 8. Вентилация, Приложение 8.1. Методически указания за оразмеряване на вентилацията на пътни тунели, АПИ, 2014.

O'Gorman S., Nuttall R., Purchase A., An Investigation of Longitudinal Ventilation for Short Road Tunnels with High Fire HRR, 6<sup>th</sup> International Conf. "Tunnel Safety and Ventilation" 2012, Graz, pp. 149- 155.

Jacque E., P. Wauters, Improving of Ventilation Efficiency of Jet Fans in Longitudinally Ventilated Rectangular Ducts, Proc. of the US Mine Vent. Symp., 1999.

Road Tunnel, Standard, Norwegian Public Roads Administration, 2004, ISBN 82-7207-540-7.

Статията е рецензирана от проф. Михаил Михайлов и препоръчана за публикуване от кат. „Руднична вентилация и техническа безопасност“.