

RESEARCH OF THE ELECTRICAL EFFICIENCY OF DEAD-END VENTILATION WITH A LOCAL VENTILATION SYSTEM

Nikolay Lakov, Desislava Delcheva

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nlakov@mgu.bg; desi.delcheva@mgu.bg

ABSTRACT. The absence of rational management of local ventilation systems leads to an increase in electricity consumption for ventilating dead-end workings at an increasing cost of electricity. The aim is to achieve ventilation and economic efficiency with increased safety by controlling the ventilation technology. This paper presents results obtained from a laboratory test of a centrifugal fan which simulated the ventilation of a dead-end workings.

Key words: energy efficiency, local ventilation, dead-end ventilation.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ ПРИ ПРОВЕТРЯВАНЕ НА ГЛУХА МИННА ИЗРАБОТКА С УРЕДБА ЗА МЕСТНО ПРОВЕТРЯВАНЕ

Николай Лакое, Десислава Делчева

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Отсъствието на рационално управление на местните вентилационни уредби води до нарастване на разхода на електроенергия за проветряване на глухи изработки при нарастваща цена на електроенергията. Целта е чрез управление на вентилационната техника да се постигне вентилационна и икономическа ефективност при повишена безопасност. В доклада са представени резултати, получени от лабораторно изпитване на центробежен вентилатор, чрез който е симулирано проветряването на глуха изработка.

Ключови думи: енергийна ефективност, местно проветряване, проветряване на глуха изработка.

Въведение

Местното проветряване в подземните рудници се осъществява с осови или центробежни вентилатори, които се използват за принудително проветряване на глухи изработки. Те се произвеждат с различни размери, скорост на въртене, напрежение и инсталирана мощност. Обикновено времето на тяхната работа е повече от 20 часа в денонощието, а също така в някои случаи тяхната инсталирана мощност достига или надвишава мощностите на вентилаторите, осъществяващи главно проветряване (Dinchev, 2017). Това налага в процеса на работа да се контролира и регулира тяхната електроенергийна ефективност.

Методика на изследването

Обект на настоящето изследване е центробежен вентилатор, тип ВСН2, производство на машиностроителен завод “Спартак” – Бургас, работещ по схема на нагнетяване. Изследването е направено в лабораторията по „Руднична вентилация“ към МГУ „Св. Иван Рилски“. Изпитваният вентилатор се задвижва от трифазен асинхронен електродвигател с мощност 3кW чрез ремъчна предавка. Честотата на въртене на електродвигателя се изменя в

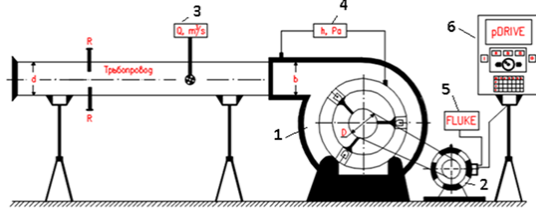
широки граници с помощта на честотен инвертор рDRIVE MX есо на фирма Schneider Electric.

На фиг.1 е показан стенд за местно проветряване, чрез който се симулира проветряването на глуха минна изработка. При пускане в работа вентилаторът засмуква въздух от атмосферата и го нагнетява в напорния тръбопровод, който е с напречно сечение $S=0,2*0,18=0,036m^2$. По дължината на тръбопровода са монтирани шибърни затвори, с които може да се регулира дебитът през вентилатора. Входът на вентилатора е с кръгло сечение с диаметър $D = 330mm$, а изходът – с правоъгълно с размери $a = 200 mm$ и $b = 240 mm$.

За измерване на статичното (пълното) налягане $h_{ст}$, [Pa] е използван **манометър, тип 2081P**, свързан към входа и изхода на вентилатора. Дебитът Q (m^3/s) е определен като произведение на средната скорост U (m/s) по сечението на тръбопровода S (m^2) (Бояджиев, Георгиев, 2020). За измерването на средната скорост на въздушното течение е използван **крпчат анемометър Testo 416**. Данните за температурата, влажността и барометричното налягане са отчетени чрез сензори и датчици, които са свързани към устройство за регистриране на данни **LabQuest 2** на фирма Vernier.

Данните за консумираната от електродвигателя активна, реактивна, пълна мощност, напрежение, ток и

честота са отчетени с помощта на преносим трифазен анализатор на качеството на електроенергията **Fluke 435**.



Фиг. 1. Стенд за местно проветряване

1. центробежен вентилатор тип BCH2;
2. трифазен асинхронен електродвигател с мощност 3kW;
3. крилчат анемометър Testo 416;
4. манометър тип 2081P;
5. преносим трифазен анализатор на качеството на електроенергията Fluke 435;
6. честотен инвертор pDRIVE MX eco 4V132.



Резултати от изпитванията и получени експериментални емпирични зависимости.

Изследването е реализирано в три стъпки:

А. Построяване на работните характеристики на центробежния вентилатор ВСН 2.

Основните показатели, необходими за построяване на работните характеристики, се получават чрез изпитване на вентилатора. Показателите са: дебит, налягане, мощност на вентилатора, коефициент на полезно действие и честота на въртене на вала. (Динчев, 2019)

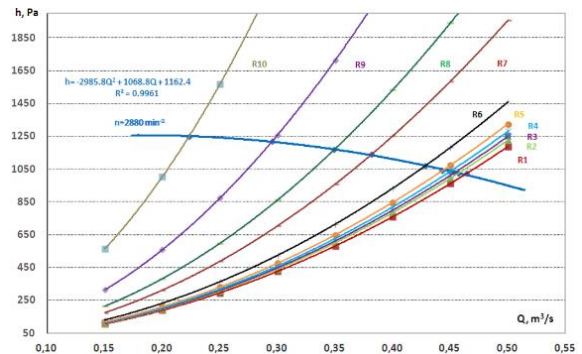
Вентилаторната характеристика представлява графична зависимост между пълното налягане, във функция на дебита $Q = f(h)$, при постоянна честота на въртене на работното колело (в случая $n=2880 \text{ min}^{-1}$). За да се построи, се изменят стойностите на показателите на вентилатора (Q и h), чрез изменение на аеродинамичното съпротивление на изпитвания стенд ($R_1 \div R_{10}$), което се постига, чрез притваряне и затваряне на шибърни затвори (от напълно отворен тръбопровод до напълно затворен т.е. при различна дължина на тръбопровода). След което се отчитат показанията на измервателните уреди.

Резултатите от данните, снети от измервателните уреди без регулиране, са нанесени в таблица 1.

Таблица 1.

Точка на измерване	U, m/s	Q, m ³ /s	h, Pa	R, kg/m ²	Лнтр, m	Nв, kW	I, A	V, V	P, kW
R1	12.9	0.464	1025.5	4763.2	65.78	0.806	2.82	404.52	1.243
R2	12.7	0.457	1026.7	4915.9	67.89	0.795	2.81	404.44	1.241
R3	12.6	0.454	1029.3	4993.8	68.96	0.792	2.80	404.42	1.239
R4	12.5	0.450	1038	5125.9	70.79	0.779	2.79	404.40	1.238
R5	12.3	0.443	1040.3	5300.9	73.20	0.781	2.80	404.41	1.235
R6	11.9	0.428	1072	5852.1	80.82	0.777	2.81	404.39	1.232
R7	10.6	0.382	1140.7	7817.1	107.95	0.738	2.76	404.38	1.231
R8	9.7	0.349	1169.3	9600.1	132.57	0.691	2.75	404.39	1.231
R9	8.2	0.295	1219.7	14015.5	193.55	0.609	2.78	404.41	1.230
R10	6.2	0.223	1251.2	25160.1	347.45	0.473	2.74	404.40	1.231

От данните в таблица 1 е построена вентилаторната характеристика, показана на фиг. 2.



Фиг. 2. Характеристика на центробежния вентилатор и взаимодействието му с тръбопровода при $n=2880 \text{ min}^{-1}$

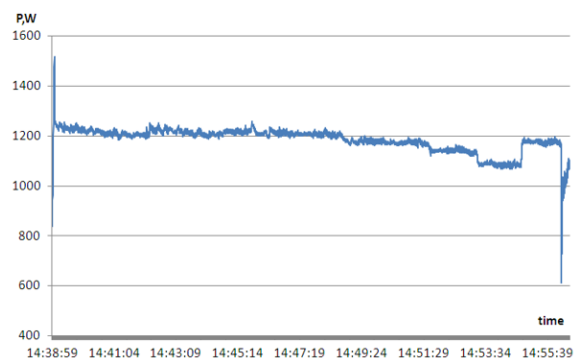
От характеристиката се вижда, че с увеличаване на съпротивлението на мрежата, дебитът намалява, а налягането се увеличава.

От вентилаторната характеристика (фиг. 2) е изведен корелационен модел за определяне на налягането h в зависимост от дебита Q (Dinev, Iliev, 2017).

$$h = -2985,8Q^2 + 1068,8Q + 1162,4$$

Това уравнение представлява полином от втора степен със средно квадратично отклонение $R^2 = 0,9961$. В случая интервалът, в който стъпково може да се определи налягането h , е от 0,1 до 0,55 m³/s.

От проведените измервания на електрическите параметри на двигателя са отчетени средните стойности на тока, напрежението и активната мощност в зависимост от времето за провеждане на експеримента. Резултатите от данните са показани в таблица 1, а графичното представяне на активната мощност на фиг. 3.



Фиг. 3. Активна мощност

Б. Построяване на теоретичните характеристики на вентилатора при различна честота на въртене на работното колело.

На база на опитно получената работна характеристика (фиг. 2) при постоянна честота на въртене $n'=2880 \text{ min}^{-1}$, са построени и теоретичните (универсалните) работни характеристики на вентилатора при друга честота на въртене n (Киров, Илиев, 2017).

За целта от инвертора се задават различни стойности на оборотите, променящи се със стъпка 200 min^{-1} , след което се отчита скоростта на въздуха в тръбопровода U [m/s], налягането h [Pa] и всички електрически параметри (ток I , напрежение V и активна мощност P). Опитът е направен при постоянно аеродинамично съпротивление в случая R7. С намаляването на оборотите характеристиките се разполагат една под друга.

Тъй като при различните режими на работа честотата на въртене на вала на двигателя е различна, необходимо е определените показатели на вентилатора (Q, h, P) да се приведат към постоянната (номиналната) честота на въртене на електродвигателя, която в случая е $n'=2880 \text{ min}^{-1}$. Това се постига, чрез използване уравнения на подобие (законали на пропорционалността), при различна честота на въртене (Власева, Динчев, Петров, Михайлов, 2008):

$$\frac{Q}{Q'} = \left(\frac{n}{n'}\right) \quad (1)$$

$$\frac{h}{h'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{P}{P'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3 \quad (3)$$

където:

(n/n') – скоростно отношение на новата n , спрямо началната скорост n' ;

(h/h') – изменение на пълното, статичното и динамичното налягане;

(P/P') – изменение мощността на вентилатора с промяна на скоростта.

За получаване на показателите на вентилатора Q и h при честота на въртене n се използват първите две уравнения (1) и (2).

$$Q = Q' * \left(\frac{n}{2880}\right) \quad (5)$$

$$h = h' * \left(\frac{n}{2880}\right)^2 \quad (6)$$

където Q' и h' са показателите на вентилатора при $n' = 2880 \text{ min}^{-1}$.

Следва преизчисляване показателите на вентилатора при другите честоти на въртене, ($n = 2800 \div 1000 \text{ min}^{-1}$).

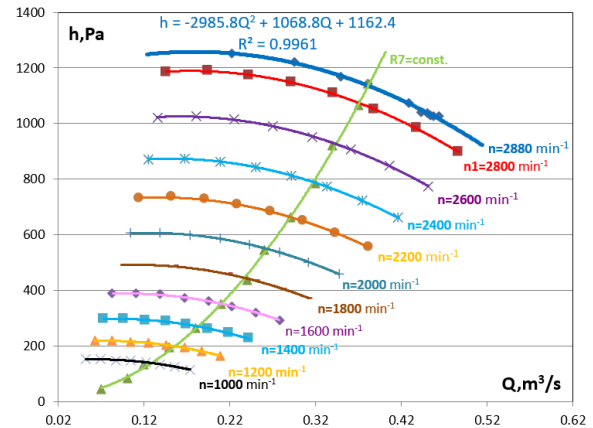
Резултатите от измерванията и пресмятията са нанесени в таблица 2 при следните начални условия:

- ✓ температура на въздуха $T = 26,6 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ✓ относителна влажност $\varphi = 44,92 \%$;
- ✓ барометрично налягане $P_{bar} = 96,194 \text{ kPa}$.

Кривите на аеродинамичните съпротивления R_T , са построени от стойностите за налягането (h) и дебита (Q), записани в таблица 2.

Таблица 2

Точка на измерване	$n, \text{ min}^{-1}$	$U, \text{ m/s}$	$Q, \text{ m}^3/\text{s}$	$h, \text{ Pa}$	$N_b, \text{ kW}$	$I, \text{ A}$	$V, \text{ V}$	$P, \text{ kW}$	
R7=7817.1 kg/m ³	2880	10.6	0.382	1140.7	0.74	2.77	406.2	1.23	
	2800	10.3	0.370	1065.7	0.67	2.54	406.3	1.1	
	2600	9.6	0.340	919.7	0.53	2.24	406.2	0.89	
	2400	8.9	0.320	786	0.43	1.98	406.1	0.78	
	2200	8.2	0.290	659.7	0.32	1.67	405.9	0.61	
	2000	7.4	0.260	544.3	0.24	1.46	405.7	0.5	
	1800	6.7	0.240	437.3	0.18	0.87	405.6	0.37	
	Lнтр=107.95 m	1600	6	0.210	350.3	0.12	0.64	405.5	0.32
		1400	5.2	0.180	264.7	0.08	0.51	405.3	0.25
		1200	4.4	0.150	193	0.05	0.42	405.2	0.2
1000		3.6	0.120	133.7	0.03	0.34	405.2	0.15	
800		2.8	0.100	82	0.01	0.25	405.1	0.12	
600		2	0.070	41.5	0.005	0.16	405.0	0.08	



Фиг. 4 Характеристики на вентилатора при различни честоти на въртене при постоянно съпротивление R7

Отделните характеристики при различни обороти са построени като е използвано основното уравнение на вентилатора $h = -2985,8Q^2 + 1068,8Q + 1162,4$. Интервалът, в който стъпково се определя h , е от $(0,05 \div 0,5) \text{ m}^3/\text{s}$. Новите стойности за дебита $Q_{\text{НОВО}}$ и налягането $h_{\text{НОВО}}$ са получени като са използвани уравнения на подобие при различна честота на въртене.

Като пример е разгледан случаят, при който е построена вентилаторната характеристиката при обороти 2800 min^{-1} . Данните от пресмятията са показани в таблица 3.

Таблица 3

$n/n' = 2800 / 2880$			
$h' = -2985,8 Q'^2 + 1068,8 Q' + 1162,4$			
$Q', \text{ m}^3/\text{s}$	$h', \text{ Pa}$	$h = h' * (n/n')^2$	$Q = Q' * (n/n')$
		$h_{\text{НОВО}}, \text{ Pa}$	$Q_{\text{НОВО}}, \text{ m}^3/\text{s}$
0.05	1208.376	1142.176	0.048611
0.10	1239.422	1171.522	0.097222
0.15	1255.54	1186.756	0.145833
0.20	1256.728	1187.879	0.194444
0.25	1242.988	1174.892	0.243056
0.30	1214.318	1147.793	0.291667
0.35	1170.72	1106.583	0.340278
0.40	1112.192	1051.262	0.388889
0.45	1038.736	981.8295	0.4375
0.50	950.35	898.2861	0.486111

По същия начин са получени и другите характеристики на вентилатора при различни обороти.

В. Построяване на характеристики чрез управление на един параметър (регулиране на дебита Q чрез инвертора).

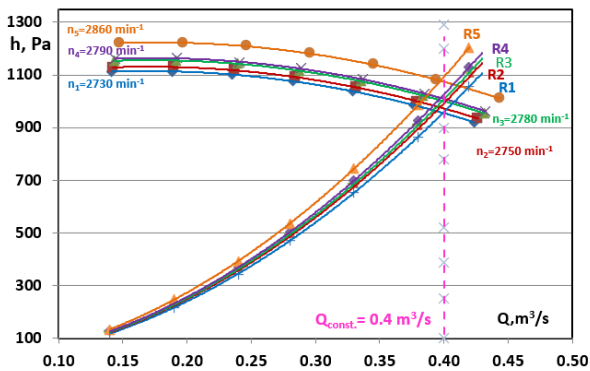
Целта на регулирането е да се поддържа постоянен дебит Q_{const} , от вентилатора, независимо от изменението на съпротивлението на мрежата R. Това е реализирано с помощта на честотния инвертор **pDRIVE MX eco 4V132**, който получава сигнал от датчик за скорост (анемометър). Този сигнал се трансформира в неговия блок за управление. От там той го взема и спрямо делтата на сигнала, на този който има, започва да увеличава оборотите си докато се достигне желания дебит Q_{const} . Това се случва автоматично в зависимост от предварително зададените настройки. Опитът е направен за конкретна стойност на дебита от работната област на вентилатора **BCH 2**.

Резултатите, получени чрез управление по дебит, са показани в таблица 4. Характеристиките на вентилатора при различни обороти, в зависимост от съпротивлението на мрежата, получени чрез регулиране на дебита Q_{const} , са показани на фиг. 5,6 и 7. Измерванията са направени при следните начални условия:

- ✓ температура на въздуха $T = 26,4^{\circ}C$;
- ✓ относителна влажност $\varphi = 47,03\%$;
- ✓ барометрично налягане $P_{bar} = 96,157\text{ kPa}$;

Таблица 4

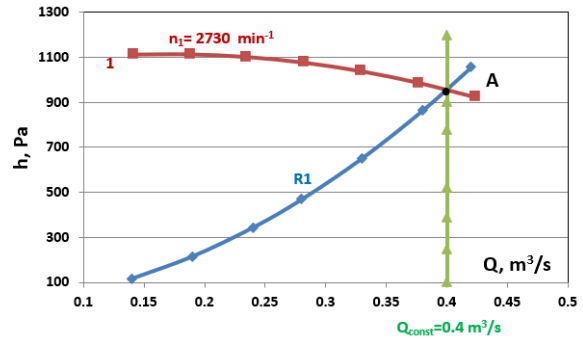
U = 11.1 m/s, Q = 0.4 m³/s								
Точка на измерване	n, min ⁻¹	h, Pa	R, kg/m ²	Лнтр, m	Нв, kW	V, V	I, A	P, kW
R1	2730	911	5693.7	78.63	0.617	405.4	2.11	0.86
R2	2750	943	5893.7	81.39	0.639	405.5	2.43	1.03
R3	2780	957	5981.2	82.60	0.648	405.6	2.72	1.1
R4	2790	975	6093.7	84.15	0.661	405.7	2.79	1.12
R5	2860	1038	6487.5	89.59	0.703	405.8	2.86	1.25



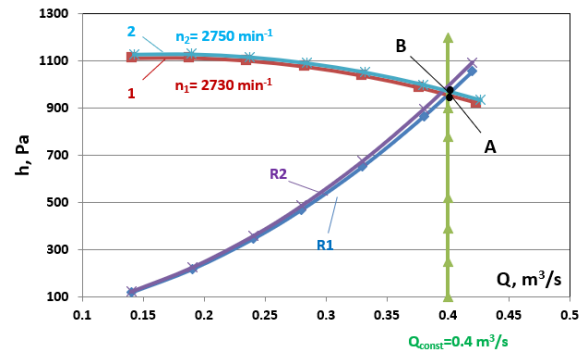
Фиг. 5. Характеристики на вентилатора при различни обороти в зависимост от съпротивлението на мрежата получени за осигуряване на зададен дебит $Q_{const} = 0.4\text{ m}^3/\text{s}$.

Пояснение на фиг. 5. От пулта за управление на честотния инвертор се задава желаният дебит, който в случая е $Q_{const} = 0.4\text{ m}^3/\text{s}$. В първия момент под действието на аеродинамичното съпротивление R_1 , характеристиката 1 на вентилатора е постигната при обороти $n_1=2730\text{ min}^{-1}$. От пресичането на двете характеристики е получена работна точка А (фиг.6). В следващия момент увеличаваме съпротивлението чрез притваряне на част от сечението. От това притваряне съпротивлението се променя на R_2 . В този случай, за да се постигне желаното Q_{const} , е необходимо двигателят чрез инвертора да увеличи своите обороти. Работната точка се прехвърля от характеристика 1 (т. А) на характеристика 2 (т. В) (фиг.7), което е постигнато чрез увеличаването на оборотите $n_2=2750\text{ min}^{-1}$. Действията са

аналогични при следващи притваряния на сечението, водещи до увеличаване на съпротивленията (R_3, R_4 и R_5).



Фиг. 6. Определяне на работна точка (А)



Фиг. 7. Определяне на работна точка (В)

Г. Определяне на икономически изгоден режим на работа.

При проведените лабораторни изследвания на работата на вентилатора при различни обороти, се потвърждават зависимостите (1) и (3).

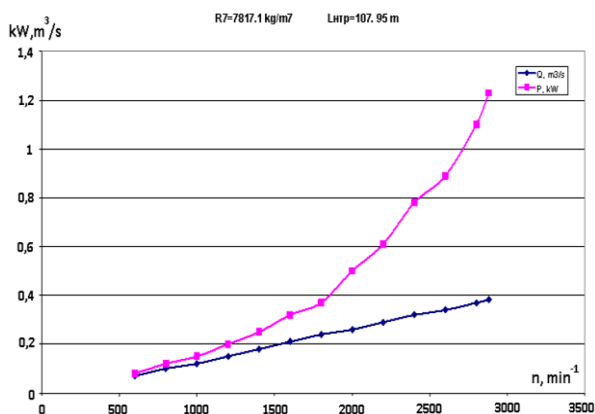
В таблица 5 са синтезирани резултатите от изследването и е определен специфичният разход на електроенергия при различни обороти и константно съпротивление на мрежата $R_7=7817,1\text{ kg/m}^2$, а на фиг. 8 са показани графично зависимостите на производителността на вентилатора Q и черпената от двигателя мощност.

Таблица 5

n, min ⁻¹	U, m/s	h, Pa	Q, m³/s	P, kW	kWhs/m³
2880	10,6	1140,7	0,382	1,23	3,219
2800	10,3	1065,7	0,37	1,1	2,972
2600	9,6	919,7	0,34	0,89	2,617
2400	8,9	786	0,32	0,78	2,437
2200	8,2	659,7	0,29	0,61	2,103
2000	7,4	544,3	0,26	0,5	1,923
1800	6,7	437,3	0,24	0,37	1,541
1600	6	350,3	0,21	0,32	1,523
1400	5,2	264,7	0,18	0,25	1,388
1200	4,4	193	0,15	0,2	1,333
1000	3,6	133,7	0,12	0,15	1,25
800	2,8	82	0,1	0,12	1,2
600	2	41,5	0,07	0,08	1,142

Потвърждават се изследвания в (Dzhustrov, 2019; Chetyov, Dzhustrov, 2020), че при конкретните условия е необходимо чрез промяната на скоростта и натоварването

да се търсят оптималните за минимизиране енергийни разходи, запазвайки необходимата производителност.



Фиг. 8. Зависимости на производителността на вентилатора Q и черпената от двигателя мощност P при съпротивление на мрежата $R7=7817,1 \text{ kg/m}^7$.

От фиг. 8 се вижда линейното нарастване на производителността във функция от оборотите, както и нарастването на черпената от двигателя мощност на трета степен. Специфичният разход на електроенергия също ще бъде пропорционален на изменението на мощността, т.е. зависимостта му е на трета степен от оборотите на двигателя. От фигурата е видно, че при около 2/3 по-малки обороти (в случая 63% или 1800 min^{-1}) от номиналните за двигателя ще има относително малък специфичен разход на електроенергия. Те са в границите от 1,14 до 1,52 kWh/m^3 , което е нарастване от 33%. В същото време производителността е около 63% от максималната за конкретната вентилационна мрежа при дадения вентилационен агрегат. При достигане на номиналните обороти на двигателя, изменението на специфичния разход на електроенергия спрямо тази при 1800 min^{-1} е 2,1 пъти, като увеличението на производителността е само 37%. За конкретния случай ($R7=7817,1 \text{ kg/m}^7$ и 1800 min^{-1}), годишната икономия на електроенергия ще бъде:

$$\begin{aligned} \Delta W_{\text{год.}} &= \Delta W_{\text{год.}(2880)} - \Delta W_{\text{год.}(1800)} = \\ &= T_{\text{год.}} * (Q_n * \omega_n - Q_0 * \omega_0) = \\ &= 7665 * (0,382 * 3,219) - (0,24 * 1,541) \\ &= 6591 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (7)$$

където:

$T_{\text{год.}}$ – годишното време на работа (3 смени по 7 часа по 365 дни) = 7665h;

Q_n, Q_0 – производителността на вентилатора при номинални и оптимални обороти, взети от таблица 5;

ω_n, ω_0 – специфичният разход на електроенергия при номинални и оптимални обороти, взети от таблица 5.

Заклучение

1. В проведеното експериментално изпитание се доказва необходимостта от периодично изследване на вентилационните уредби на подземните рудници поради непрекъснатата промяна на характеристиката на вентилационната мрежа. Промяната на която и да е от параметрите ѝ води до преразход на електроенергия. Поради непрекъснатия режим на работа в много случаи е по-удачно проектиране на нова вентилационна уредба.

2. Експериментално е доказано, че значителен икономически ефект се получава при избор на по-мощен вентилатор, както и с управление оборотите на двигателя в зависимост от необходимия дебит.

3. Направените изпитания доказват, че характеристиките при различни обороти се подчиняват на законите на подобие.

Литература

- Бояджиев, М., Л. Георгиев. 2020. *Управление на газовата инфраструктура*, Издателство на МГУ „Св. Иван Рилски“, 180 стр. ISBN 978-954-353-428-9
- Власева, Е., З. Динчев, Т. Петров, М. Михайлов. 2008. Повишаване на ефективността на минните вентилаторни уредби, *Национална научно-техническа конференция „Съвременни технологии и практики при подземно разработване на полезните изкопаеми“*, Девин, стр.164-175, ISBN 978-954-91547-9-5.
- Динчев, З. 2020. *Местна Вентилация на подземни обекти*. Издателство на МГУ „Св. Иван Рилски“. 180 стр. ISBN 978-954-353-391-6
- Киров, Р., И. Илиев И. 2017. *Електроенергийна ефективност*, изд. „Ена“ ООД, гр.Варна, ISBN 978-619-7255-05-8.
- Лаков, Н. 2017. *Енергийна ефективност и управление на риска при проветряване на глухи изработки*. Издателство на МГУ „Св. Иван Рилски“, Автореферат PhD, 37 стр.
- Chetyov, St., K. Dzhustrov. 2020. Ore load influence on ball mills specific electricity consumption, *Journal of Mining and Geological Sciences*, Vol. 63, 138–141
- Dzhustrov, K. 2019. Influence of the ball load on the specific power consumption of ball mills. – *Journal of Mining and Geological Sciences*, 62, Part 3, 77–81
- Dinchev, Z. 2017. Local ventilation system's control, *Journal of mining and geological sciences of University of Mining and Geology „St. Ivan Rilski“*, Vol. 60, part II, p.43-47, ISSN 2535-1184.
- Dinev, G., Zh. Iliev. 2017. About computer design of machine and equipment the general machine building, *International Journal for Science, Technics and Innovations for the Industry*, Issue 1/2017 ISSN PRINT 1313-0226, ISSN WEB 1314-507X / 2017