

Bernard Nowak, Krzysztof Filek*, Zbigniew Kuczera*, Rafał Łuczak*,
Bogusław Ptaszyński*, Piotr Życzkowski**

STATYSTYCZNE WSKAŹNIKI OCENY JAKOŚCI PRACY CHŁODZIARKI DV-290**

1. Wprowadzenie

Utrzymanie właściwych warunków klimatycznych w kopalniach podziemnych wymaga zapewnienia odpowiednio dużego strumienia powietrza oraz coraz częściej jego dodatkowego ochładzania. Jednym ze sposobów zwalczania zagrożenia temperaturowego jest chłodzenie lokalne powietrza chłodziarkami. Jest ono uzasadnione w związku z właściwymi parametrami powietrza na stanowiskach pracy, ale wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Zdarza się, że praktyczne efekty chłodzenia powietrza takimi systemami są gorsze od oczekiwanych. Dlatego w niniejszym artykule podjęto próbę opracowania wskaźników oceny pracy chłodziarki bezpośredniego działania DV-290 z wyparną chłodnicą wody RK-450 pod kątem efektywności wykorzystania mocy chłodniczej. Za pomocą estymacji liniowej i nieliniowej, na podstawie obliczeń numerycznych bazujących na rozwiązaniu równań opisujących rzeczywiste procesy zachodzące w chłodziarkach bezpośredniego działania współpracujących z wyparnymi chłodnicami wody, wyznaczono funkcje regresji wielorakiej. Posłużyły one do oceny wykorzystania pozostającej w dyspozycji mocy chłodniczej parownika badanej chłodziarki. Otrzymane funkcje regresji wielorakiej opisujące moc cieplną parownika obowiązują w podanym przez producenta [3] i wynikającym z przeprowadzonych badań [1] zakresie pracy chłodziarki.

2. Analiza statystyczna

Statystyczne wskaźniki jakości opisujące pracę wymienionego systemu chłodzenia powietrza kopalnianego określono dla dwóch wariantów. Opisują one wzajemny związek pomiędzy pięcioma (wariant pierwszy) i sześcioma (wariant drugi) mierzonymi parametrami powietrza na wlocie do parownika i chłodnicy wyparnej wody. W utworzonych

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

** Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt badawczy nr N N524 2169 33

wskaźnikach (kryteriach) parametry powietrza na wlotach tych wymienników pełnią funkcję zmiennych niezależnych, zaś moc parownika N_p pełni rolę zmiennej zależnej.

W pierwszym wariancie uznano za zmienne niezależne: wydatek przepływu powietrza przez parownik V_p [m^3/min], jego temperaturę t_p [$^{\circ}\text{C}$] i wilgotność względną φ_p [%] na wlocie parownika oraz temperaturę t_c [$^{\circ}\text{C}$] i wilgotność względną φ_c [%] powietrza na wlocie do wyparnej chłodnicy wody. W drugim wariancie jako szóstą zmienną niezależną przyjęto wydatek przepływu powietrza przez wyparną chłodnicę wody V_c [m^3/min]. W wariancie pierwszym, w którym wykorzystano wartości zmiennych niezależnych uzyskane drogą pomiarów, wydatek przepływu powietrza przez parownik i chłodnicę wyparną był taki sam – stąd mniejsza liczba zmiennych niezależnych niż w wariancie drugim, gdzie wykorzystano wyniki numerycznych rozwiązań równań matematycznego modelu systemu chłodzenia.

Do opisu zmiennej zależnej N (moc parownika) w funkcji parametrów wejściowych powietrza w parowniku i chłodnicy wyparnej utworzono modele statystyczne liniowe i nieliniowe. Skorzystano z dwóch metod estymacji nieliniowej: metody Hooke’a–Jeevesa przemieszczenia układu oraz metody Hooke’a–Jeevesa i quasi-Newtona [4, 5].

Aby uprościć otrzymane równania statystyczne, dla każdej funkcji regresji zmodyfikowano wartości stałych, otrzymując nowe postacie równań, w których zmienną zależną oznaczono przez N_z . W ten sposób uzyskano dla każdego z wariantów sześć równań, które przedstawiono poniżej:

— wariant pierwszy – dla pięciu zmiennych niezależnych:

- regresja liniowa

$$N = 0,375428 \cdot V_p + 9,859262 \cdot t_p + 2,287426 \cdot \varphi_p - 0,047179 \cdot t_c - 0,249434 \cdot \varphi_c - 409 \quad (1)$$

- regresja liniowa ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników funkcji

$$N_z = 0,37 \cdot V_p + 10,0 \cdot t_p + 2,3 \cdot \varphi_p - 0,1 \cdot t_c - 0,3 \cdot \varphi_c - 406,8 \quad (2)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke’a–Jeevesa przemieszczenia układu

$$N = 18,30815 \cdot V_p^{0,5} + 0,543706 \cdot t_p^{1,7} - 7500 \cdot \varphi_p^{-0,7} + 0,5 \cdot t_c^{-0,2} \quad (3)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke’a–Jeevesa przemieszczenia układu ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników i wykładników funkcji

$$N_z = 18,3 \cdot V_p^{0,5} + 0,5 \cdot t_p^{1,7} - 7164,45 \cdot \varphi_p^{-0,7} + 0,5 \cdot t_c^{-0,2} \quad (4)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke’a–Jeevesa i quasi-Newtona

$$N = 194,2126 \cdot V_p^{0,25} - 5848,75 \cdot t_p^{-0,6} - 2920,73 \cdot \varphi_p^{-0,2} + 1953,845 \cdot t_c^{-0,1} - 15,6768 \cdot \varphi_c^{0,5} \quad (5)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników i wykładników funkcji

$$N_z = 194 \cdot V_p^{0,25} - 5839,12 \cdot t_p^{-0,6} - 2920,7 \cdot \varphi_p^{-0,2} + 1953,8 \cdot t_c^{-0,1} - 15,7 \cdot \varphi_c^{0,5} \quad (6)$$

— wariant drugi – dla sześciu zmiennych niezależnych:

- regresja liniowa

$$N = 0,323 \cdot V_p + 19,656 \cdot t_p + 1,421 \cdot \varphi_p - 12,149 \cdot t_c - 2,704 \cdot \varphi_c + 0,211 \cdot V_c - 260 \quad (7)$$

- regresja liniowa ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników funkcji

$$N_z = 0,3 \cdot V_p + 19,7 \cdot t_p + 1,4 \cdot \varphi_p - 12 \cdot t_c - 2,7 \cdot \varphi_c + 0,2 \cdot V_c - 250 \quad (8)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu

$$N = 0,019 \cdot V_p^{1,408} + 1,485 \cdot t_p^{1,603} + 0,003 \cdot \varphi_p^{2,3} + 42979,59 \cdot t_c^{-1,7} - 0,1 \cdot \varphi_c^{1,7} - 719,08 \cdot V_c^{-0,11} \quad (9)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników i wykładników funkcji

$$N_z = 0,02 \cdot V_p^{1,4} + 1,5 \cdot t_p^{1,6} + 0,003 \cdot \varphi_p^{2,3} + 42979,6 \cdot t_c^{-1,7} - 0,1 \cdot \varphi_c^{1,7} - 675,8 \cdot V_c^{-0,1} \quad (10)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona

$$N = 219,98 \cdot V_p^{0,2} + 2996,58 \cdot t_p^{0,13} + 709,8 \cdot \varphi_p^{0,07} - 2823,7 \cdot t_c^{0,11} - 2812 \cdot \varphi_c^{0,059} + 790 \cdot V_c^{0,1} \quad (11)$$

- regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników i wykładników funkcji

$$N_z = 220 \cdot V_p^{0,2} + 2997 \cdot t_p^{0,13} + 710 \cdot \varphi_p^{0,07} - 2920 \cdot t_c^{0,1} - 2800 \cdot \varphi_c^{0,06} + 790 \cdot V_c^{0,1} \quad (12)$$

Na stanowisku pomiarowym przepływ powietrza przez parownik i chłodnicę wyparną wody wymuszał jeden wentylator, w związku z tym w powyższych wzorach, dla porównania otrzymanych danych pomiarowych z obliczeniami numerycznymi, przyjęto przyrost temperatury spowodowany pracą wentylatora $\Delta t = 0$.

Wyniki dla chłodziarki DV-290 z wyparną chłodnicą wody RK-450 otrzymane na podstawie danych z obliczeń numerycznych przedstawiono w tabeli 1. Natomiast w tabelach 2, 3, 4 przedstawiono moc parownika wraz z odchyłkami od wartości zmierzonych przed modyfikacją i po modyfikacji stałych, z sześcioma zmiennymi niezależnymi dla regresji liniowej i nieliniowej.

TABELA 1

Wyniki obliczeń dla chłodziarki DV-290 z wyparną chłodnicą wody RK-450

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Parametry powietrza wlotowego					
			do parownika			do chłodnicy wyparnej		
			Wydatek objętościowy V_p	Temperatura t_p	Wilgotność względna φ_p	Temperatura t_c	Wilgotność względna φ_c	Wydatek objętościowy V_c
kW	m ³ /min	°C	%	°C	%	m ³ /min		
1	DV-290 i RK-450	236,8	500	32,5	69,41	29	71,21	500
2		180,1	500	32,5	69,41	29	80,11	500
3		192,6	500	32,5	69,41	30	71,27	500
4		135,8	500	32,5	69,41	30	80,18	500
5		254,4	500	32,5	69,41	29	71,21	550
6		192,4	500	32,5	69,41	29	80,11	550
7		205,7	500	32,5	69,41	30	71,27	550
8		144,2	500	32,5	69,41	30	80,18	550
9		260,8	500	32,5	69,41	29	71,21	600
10		204,4	500	32,5	69,41	29	80,11	600
11		218,4	500	32,5	69,41	30	71,27	600
12		152,4	500	32,5	69,41	30	80,18	600
13		205,0	350	32,5	69,41	27	71,08	550
14		214,3	350	32,5	78,08	27	71,08	550
15		222,6	350	34,5	69,55	27	71,08	550
16		232,4	350	34,5	78,24	27	71,08	550
17		260,8	500	32,5	69,41	27	71,08	550
18		272,2	500	32,5	78,08	27	71,08	550
19		283,0	500	34,5	69,55	27	71,08	550
20		295,0	500	34,5	78,24	27	71,08	550
21		310,0	650	32,5	69,41	27	71,08	550
22		323,3	650	32,5	78,08	27	71,08	550
23		325,9	650	34,5	69,55	27	71,08	550
24		327,8	650	34,5	78,24	27	71,08	550

TABELA 2

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji liniowej przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników (sześć zmiennych niezależnych)

Nr serii-pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji liniowej			dla regresji liniowej po modyfikacji wartości współczynników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	236,8	196,6	40,2	17,0	197,2	39,6	16,7
2		180,1	172,6	7,5	4,2	173,1	7,0	3,9
3		192,6	184,3	8,3	4,3	185,0	7,6	4,0
4		135,8	160,2	-24,4	-18,0	160,9	-25,1	-18,5
5		254,4	207,2	47,2	18,6	207,2	47,2	18,6
6		192,4	183,1	9,3	4,8	183,1	9,3	4,8
7		205,7	194,9	10,8	5,3	195,0	10,7	5,2
8		144,2	170,8	-26,6	-18,4	170,9	-26,7	-18,5
9		260,8	217,7	43,1	16,5	217,2	43,6	16,7
10		204,4	193,7	10,7	5,3	193,1	11,3	5,5
11		218,4	205,4	13,0	6,0	205,0	13,4	6,1
12		152,4	181,3	-28,9	-19,0	180,9	-28,5	-18,7
13		205,0	183,4	21,6	10,6	186,5	18,5	9,0
14		214,3	195,7	18,6	8,7	198,6	15,7	7,3
15		222,6	222,7	-0,1	0,0	226,1	-3,5	-1,6
16		232,4	235,0	-2,6	-1,1	238,3	-5,9	-2,5
17		260,8	231,8	29,0	11,1	231,5	29,3	11,2
18		272,2	244,1	28,1	10,3	243,6	28,6	10,5
19		283,0	271,1	11,9	4,2	271,1	11,9	4,2
20		295,0	283,5	11,5	3,9	283,3	11,7	4,0
21		310,0	280,3	29,7	9,6	276,5	33,5	10,8
22		323,3	292,6	30,7	9,5	288,6	34,7	10,7
23		325,9	319,6	6,3	1,9	316,1	9,8	3,0
24		327,8	331,9	-4,1	-1,3	328,3	-0,5	-0,1

TABELA 3

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników (sześć zmiennych niezależnych)

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji nieliniowej			dla regresji nieliniowej po modyfikacji wartości współczynników i wykładników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	236,8	201,6	35,2	14,9	201,6	35,2	14,9
2		180,1	170,4	9,7	5,4	170,4	9,7	5,4
3		192,6	193,6	-1,0	-0,5	193,6	-1,0	-0,5
4		135,8	162,2	-26,4	-19,5	162,2	-26,4	-19,5
5		254,4	205,4	49,0	19,3	205,1	49,3	19,4
6		192,4	174,1	18,3	9,5	173,8	18,6	9,7
7		205,7	197,3	8,4	4,1	197,0	8,7	4,2
8		144,2	166,0	-21,8	-15,1	165,7	-21,5	-14,9
9		260,8	208,8	52,0	19,9	208,2	52,6	20,2
10		204,4	177,6	26,8	13,1	176,9	27,5	13,4
11		218,4	200,8	17,6	8,1	200,1	18,3	8,4
12		152,4	169,4	-17,0	-11,2	168,8	-16,4	-10,8
13		205,0	176,6	28,4	13,8	176,4	28,6	13,9
14		214,3	192,7	21,6	10,1	192,5	21,8	10,2
15		222,6	216,4	6,2	2,8	216,1	6,5	2,9
16		232,4	232,5	-0,1	-0,1	232,2	0,2	0,1
17		260,8	224,0	36,8	14,1	223,6	37,2	14,3
18		272,2	240,0	32,2	11,8	239,7	32,5	12,0
19		283,0	263,8	19,2	6,8	263,3	19,7	6,9
20		295,0	279,9	15,1	5,1	279,5	15,5	5,3
21		310,0	277,6	32,4	10,5	276,9	33,1	10,7
22		323,3	293,6	29,7	9,2	293,0	30,3	9,4
23		325,9	317,4	8,5	2,6	316,7	9,2	2,8
24		327,8	333,5	-5,7	-1,7	332,8	-5,0	-1,5

TABELA 4

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a-Jeevesa i quasi-Newtona przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników (sześć zmiennych niezależnych)

Nr serii-pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji nieliniowej			dla regresji nieliniowej po modyfikacji wartości współczynników i wykładników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	236,8	193,4	43,4	18,3	195,0	41,8	17,6
2		180,1	168,2	11,9	6,6	169,4	10,7	5,9
3		192,6	178,0	14,6	7,6	181,0	11,6	6,0
4		135,8	152,8	-17,0	-12,5	155,3	-19,5	-14,4
5		254,4	207,5	46,9	18,4	209,1	45,3	17,8
6		192,4	182,3	10,1	5,2	183,5	8,9	4,6
7		205,7	192,1	13,6	6,6	195,1	10,6	5,2
8		144,2	166,8	-22,6	-15,7	169,4	-25,2	-17,5
9		260,8	220,5	40,3	15,4	222,1	38,7	14,8
10		204,4	195,3	9,1	4,5	196,5	7,9	3,9
11		218,4	205,0	13,4	6,1	208,0	10,4	4,7
12		152,4	179,8	-27,4	-18,0	182,4	-30,0	-19,7
13		205,0	187,5	17,5	8,6	186,2	18,8	9,2
14		214,3	195,4	18,9	8,8	194,1	20,2	9,5
15		222,6	224,3	-1,7	-0,8	223,0	-0,4	-0,2
16		232,4	232,2	0,2	0,1	230,9	1,5	0,6
17		260,8	239,9	20,9	8,0	238,6	22,2	8,5
18		272,2	247,8	24,4	8,9	246,5	25,7	9,4
19		283,0	276,8	6,2	2,2	275,5	7,5	2,7
20		295,0	284,7	10,3	3,5	283,4	11,6	3,9
21		310,0	281,0	29,0	9,3	279,7	30,3	9,8
22		323,3	288,9	34,4	10,6	287,6	35,7	11,0
23		325,9	317,9	8,0	2,5	316,6	9,3	2,9
24		327,8	325,8	2,0	0,6	324,5	3,3	1,0

W tabeli 6 przedstawiono wyniki obliczeń dla chłodziarki DV-290 z wyparną chłodnicą wody RK-450 otrzymane na podstawie danych pomiarowych [1, 2]. Przed wykonaniem obliczeń mocy cieplnej parownika każdym z podanych wyżej równań statystycznych dla pięciu i sześciu zmiennych określono jakość ich dopasowania do wyników pomiarów. Użyto do tego testu istotności opartego na rozkładzie F-Snedecora dla przyjętego poziomu ufności 0,95 i stwierdzono, że dopasowanie każdego z równań jest istotne statystycznie. Współczynniki korelacji (R) i moce korelacji (R^2) podano w tabeli 5. Porównanie wyników pomiarów z wynikami obliczeń przedstawiono w tabelach 7, 9, 11 (pięć zmiennych niezależnych) i w tabelach 8, 10, 12 (sześć zmiennych niezależnych). Pokazano w nich wyliczoną z podanych równań moc parownika, moc pomierzoną oraz odchyłki bezwzględne i względne od wartości zmierzonych.

TABELA 5

Współczynniki korelacji i moce korelacji dla poszczególnych równań statystycznych opisujących pracę chłodziarki powietrza DV-290 (pięć i sześć zmiennych niezależnych)

Lp.	Rodzaj regresji	5 zmiennych		6 zmiennych	
		R	R^2	R	R^2
1	liniowa	0,97	0,94	0,91	0,83
2	liniowa ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników funkcji	0,97	0,94	0,90	0,81
3	nieliniowa metodą Hooke'a-Jeevesa przemieszczenia układu	0,95	0,90	0,89	0,79
4	nieliniowa metodą Hooke'a-Jeevesa przemieszczenia układu ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników funkcji	0,95	0,91	0,89	0,79
5	nieliniowa metodą Hooke'a-Jeevesa i quasi-Newtona	0,96	0,93	0,92	0,85
6	nieliniowa metodą Hooke'a-Jeevesa i quasi-Newtona ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników funkcji	0,96	0,93	0,91	0,83

TABELA 6

Wyniki pomiarów chłodziarki DV-290 z wyparną chłodnicą wody RK-450

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Parametry powietrza wlotowego					
			do parownika			do chłodnicy wyparnej		
			Wydatek objętościowy V_p	Temperatura t_p	Wilgotność względna φ_p	Temperatura t_c	Wilgotność względna φ_c	Wydatek objętościowy V_c
			kW	m ³ /min	°C	%	°C	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	500	28,8	80,2	23,0	60,2	500
2		254,0	500	29,0	91,3	24,0	65,2	500
3		254,0	500	31,0	79,7	24,0	65,2	500
4		277,2	500	31,2	88,9	24,2	78,2	500
5		252,3	500	32,8	77,8	24,2	78,2	500
6		267,9	500	32,8	82,8	24,2	78,2	500
7		252,2	560	29,0	80,2	22,6	69,9	560
8		277,2	560	29,2	90,0	24,0	70,1	560
9		269,9	560	31,0	79,8	24,0	70,1	560
10		284,7	560	31,0	87,8	27,0	57,2	560
11		287,2	560	32,6	76,7	27,0	57,2	560
12		294,4	560	33,0	80,0	27,6	62,8	560

TABELA 7

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji liniowej przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników (pięć zmiennych niezależnych)

Nr serii-pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji liniowej			dla regresji liniowej po modyfikacji wartości współczynników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	230,0	0,4	0,2	230,3	0,1	0,0
2		254,0	256,1	-2,1	-0,8	256,2	-2,2	-0,9
3		254,0	249,3	4,7	1,9	249,6	4,4	1,8
4		277,2	269,0	8,2	2,9	268,8	8,4	3,0
5		252,3	259,4	-7,1	-2,8	259,3	-7,0	-2,8
6		267,9	270,8	-2,9	-1,1	270,8	-2,9	-1,1
7		252,2	252,1	0,1	0,0	251,6	0,6	0,2
8		277,2	276,4	0,8	0,3	276,0	1,2	0,4
9		269,9	270,8	-0,9	-0,3	270,5	-0,6	-0,2
10		284,7	292,2	-7,5	-2,6	292,5	-7,8	-2,7
11		287,2	282,6	4,6	1,6	283,0	4,2	1,5
12		294,4	292,6	1,8	0,6	292,8	1,6	0,5

TABELA 8

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji liniowej przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników (sześć zmiennych niezależnych)

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji liniowej			dla regresji liniowej po modyfikacji wartości współczynników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	242,2	-11,8	-5,1	241,1	-10,7	-4,6
2		254,0	236,2	17,8	7,0	235,1	18,9	7,5
3		254,0	258,9	-4,9	-1,9	258,2	-4,2	-1,7
4		277,2	238,3	38,9	14,0	237,6	39,6	14,3
5		252,3	253,8	-1,5	-0,6	253,5	-1,2	-0,5
6		267,9	260,9	7,0	2,6	260,5	7,4	2,8
7		252,2	256,8	-4,6	-1,8	253,7	-1,4	-0,6
8		277,2	257,1	20,1	7,3	254,0	23,2	8,4
9		269,9	277,8	-7,9	-2,9	275,2	-5,3	-2,0
10		284,7	287,6	-2,9	-1,0	285,2	-0,5	-0,2
11		287,2	303,2	-16,0	-5,6	301,2	-14,0	-4,9
12		294,4	293,2	1,2	0,4	291,3	3,1	1,0

TABELA 9

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników (pięć zmiennych niezależnych)

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji nieliniowej			dla regresji nieliniowej po modyfikacji wartości współczynników i wykładników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	225,8	4,6	2,0	227,9	2,5	1,1
2		254,0	257,9	-3,9	-1,5	258,6	-4,6	-1,8
3		254,0	246,2	7,8	3,1	246,7	7,3	2,9
4		277,2	274,0	3,2	1,2	273,2	4,0	1,5
5		252,3	259,0	-6,7	-2,7	258,2	-5,9	-2,4
6		267,9	274,2	-6,3	-2,3	272,7	-4,8	-1,8
7		252,2	251,6	0,6	0,2	253,6	-1,4	-0,6
8		277,2	280,5	-3,3	-1,2	281,2	-4,0	-1,4
9		269,9	270,3	-0,4	-0,2	270,8	-0,9	-0,3
10		284,7	293,0	-8,3	-2,9	292,4	-7,7	-2,7
11		287,2	277,2	10,0	3,5	276,7	10,5	3,6
12		294,4	291,9	2,5	0,9	290,6	3,8	1,3

TABELA 10

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a-Jeevesa przemieszczenia układu przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników (sześć zmiennych niezależnych)

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji nieliniowej			dla regresji nieliniowej po modyfikacji wartości współczynników i wykładników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	255,4	-25,0	-10,8	255,6	-25,2	-10,9
2		254,0	254,1	-0,1	0,0	254,2	-0,2	-0,1
3		254,0	265,1	-11,1	-4,4	265,2	-11,2	-4,4
4		277,2	242,4	34,8	12,5	242,5	34,7	12,5
5		252,3	249,1	3,2	1,3	249,1	3,2	1,3
6		267,9	259,5	8,4	3,1	259,5	8,4	3,1
7		252,2	259,9	-7,7	-3,1	259,6	-7,4	-2,9
8		277,2	263,9	13,3	4,8	263,5	13,7	4,9
9		269,9	274,6	-4,7	-1,7	274,2	-4,3	-1,6
10		284,7	297,1	-12,4	-4,4	296,7	-12,0	-4,2
11		287,2	304,1	-16,9	-5,9	303,6	-16,4	-5,7
12		294,4	296,0	-1,6	-0,5	295,5	-1,1	-0,4

TABELA 11

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników (pięć zmiennych niezależnych)

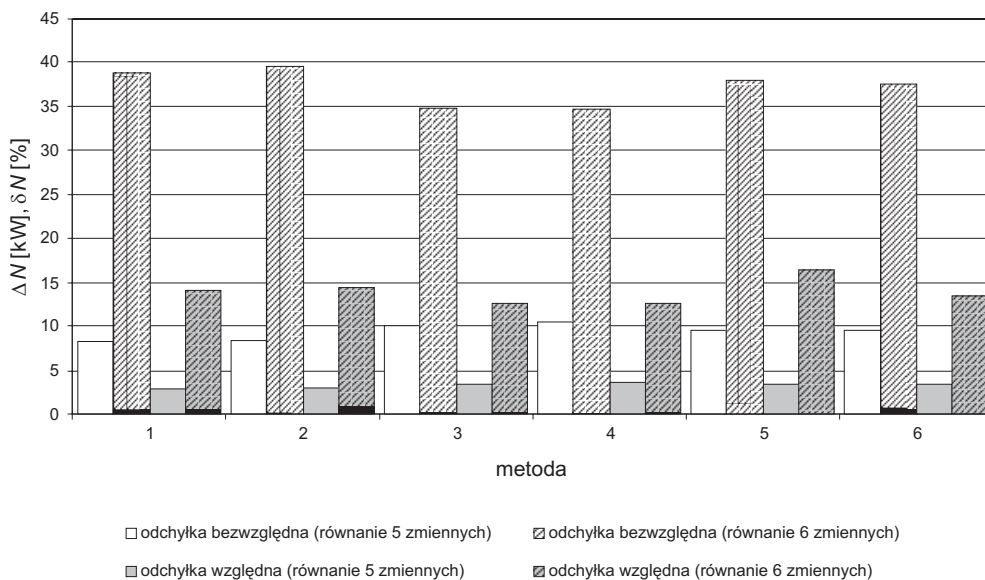
Nr serii-pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji nieliniowej			dla regresji nieliniowej po modyfikacji wartości współczynników i wykładników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	230,7	-0,3	-0,1	230,8	-0,4	-0,2
2		254,0	254,0	0,0	0,0	254,1	-0,1	0,0
3		254,0	251,8	2,2	0,9	251,8	2,2	0,9
4		277,2	267,7	9,5	3,4	267,7	9,5	3,4
5		252,3	257,5	-5,2	-2,1	257,4	-5,1	-2,0
6		267,9	272,6	-4,7	-1,8	272,6	-4,7	-1,7
7		252,2	253,4	-1,2	-0,5	253,4	-1,2	-0,5
8		277,2	275,5	1,7	0,6	275,5	1,7	0,6
9		269,9	273,8	-3,9	-1,5	273,8	-3,9	-1,4
10		284,7	292,9	-8,2	-2,9	292,9	-8,2	-2,9
11		287,2	282,3	4,9	1,7	282,3	4,9	1,7
12		294,4	289,1	5,3	1,8	289,1	5,3	1,8

TABELA 12

Wyliczona moc parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłki od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a-Jeevesa i quasi-Newtona przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników (sześć zmiennych niezależnych)

Nr serii pomiarowej	System chłodzenia	Moc parownika N_p	Wyliczona moc parownika oraz odchyłki od wartości zmierzonych					
			dla regresji nieliniowej			dla regresji nieliniowej po modyfikacji wartości współczynników i wykładników		
			Moc parownika N	Odchyłka bezwzględna ΔN	Odchyłka względna δN	Moc parownika N_z	Odchyłka bezwzględna ΔN_z	Odchyłka względna δN_z
			kW	kW	%	kW	kW	%
1	DV-290 i RK-450	230,4	268,3	-37,9	-16,5	261,3	-30,9	-13,4
2		254,0	245,7	8,3	3,3	240,0	14,0	5,5
3		254,0	276,9	-22,9	-9,0	271,2	-17,2	-6,8
4		277,2	245,8	31,4	11,3	239,7	37,5	13,5
5		252,3	267,3	-15,0	-5,9	261,3	-9,0	-3,6
6		267,9	271,5	-3,6	-1,3	265,5	2,4	0,9
7		252,2	282,7	-30,5	-12,1	274,4	-22,2	-8,8
8		277,2	267,7	9,5	3,4	261,7	15,5	5,6
9		269,9	295,8	-25,9	-9,6	289,9	-20,0	-7,4
10		284,7	293,1	-8,4	-3,0	292,6	-7,9	-2,8
11		287,2	314,7	-27,5	-9,6	314,2	-27,0	-9,4
12		294,4	295,5	-1,1	-0,4	295,5	-1,1	-0,4

W celu określenia najbardziej praktycznego do wykorzystania modelu statystycznego porównano wyliczone (przed modyfikacją i po modyfikacji wartości stałych) moce parownika oraz ich odchyłki od wartości zmierzonych. Wyniki zebrano osobno dla regresji liniowej (tabela 13) oraz nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu (tabela 14) i metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona (tabela 15). Zestawienie maksymalnych odchyłek bezwzględnych i względnych dla wszystkich badanych modeli statystycznych przedstawiono także graficznie na rysunku 1.



Rys. 1. Porównanie maksymalnych odchyłek od wartości zmierzonych dla poszczególnych modeli statystycznych: 1 – regresja liniowa, 2 – regresja liniowa ze zmodyfikowanymi współczynnikami funkcji, 3 – regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu, 4 – regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu ze zmodyfikowanymi współczynnikami i wykładnikami funkcji, 5 – regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona, 6 – regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona ze zmodyfikowanymi współczynnikami i wykładnikami funkcji

Najbardziej zbliżone wartości mocy cieplnej parownika do wyników otrzymanych podczas badań pozwalają uzyskać równania statystyczne dla pięciu zmiennych niezależnych. Nieznaczne różnice odchyłek dla tych równań uzasadniają celowość wykorzystania każdego z nich. Najmniejsze odchyłki otrzymano, korzystając z regresji liniowej, zarówno przed (1), jak i po modyfikacji stałych w równaniach (2). W obu tych przypadkach moc korelacji wynosiła 0,94.

TABELA 13

Porównanie wyliczonej mocy parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłek od wartości zmierzonych dla regresji liniowej przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników

Nr serii pomiarowej	Równanie	Moc parownika N_p	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych
			Moc parownika N		Odchyłka bezwzględna ΔN		Odchyłka względna δN	
		kW	kW		kW		%	
1	Regresja liniowa	230,4	230,0	242,2	0,4	-11,8	0,2	-5,1
2		254,0	256,1	236,2	-2,1	17,8	-0,8	7,0
3		254,0	249,3	258,9	4,7	-4,9	1,9	-1,9
4		277,2	269,0	238,3	8,2	38,9	2,9	14,0
5		252,3	259,4	253,8	-7,1	-1,5	-2,8	-0,6
6		267,9	270,8	260,9	-2,9	7,0	-1,1	2,6
7		252,2	252,1	256,8	0,1	-4,6	0,0	-1,8
8		277,2	276,4	257,1	0,8	20,1	0,3	7,3
9		269,9	270,8	277,8	-0,9	-7,9	-0,3	-2,9
10		284,7	292,2	287,6	-7,5	-2,9	-2,6	-1,0
11		287,2	282,6	303,2	4,6	-16,0	1,6	-5,6
12		294,4	292,6	293,2	1,8	1,2	0,6	0,4
1	Regresja liniowa ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników funkcji	230,4	230,3	241,1	0,1	-10,7	0,0	-4,6
2		254,0	256,2	235,1	-2,2	18,9	-0,9	7,5
3		254,0	249,6	258,2	4,4	-4,2	1,8	-1,7
4		277,2	268,8	237,6	8,4	39,6	3,0	14,3
5		252,3	259,3	253,5	-7,0	-1,2	-2,8	-0,5
6		267,9	270,8	260,5	-2,9	7,4	-1,1	2,8
7		252,2	251,6	253,7	0,6	-1,4	0,2	-0,6
8		277,2	276,0	254,0	1,2	23,2	0,4	8,4
9		269,9	270,5	275,2	-0,6	-5,3	-0,2	-2,0
10		284,7	292,5	285,2	-7,8	-0,5	-2,7	-0,2
11		287,2	283,0	301,2	4,2	-14,0	1,5	-4,9
12		294,4	292,8	291,3	1,6	3,1	0,5	1,0

TABELA 14

Porównanie wyliczonej mocy parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłek od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników

Nr serii pomiarowej	Równanie	Moc parownika N_p	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych
			Moc parownika N		Odchyłka bezwzględna ΔN		Odchyłka względna δN	
		kW	kW		kW		%	
1	Regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu	230,4	225,8	255,4	4,6	-25,0	2,0	-10,8
2		254,0	257,9	254,1	-3,9	-0,1	-1,5	0,0
3		254,0	246,2	265,1	7,8	-11,1	3,1	-4,4
4		277,2	274,0	242,4	3,2	34,8	1,2	12,5
5		252,3	259,0	249,1	-6,7	3,2	-2,7	1,3
6		267,9	274,2	259,5	-6,3	8,4	-2,3	3,1
7		252,2	251,6	259,9	0,6	-7,7	0,2	-3,1
8		277,2	280,5	263,9	-3,3	13,3	-1,2	4,8
9		269,9	270,3	274,6	-0,4	-4,7	-0,2	-1,7
10		284,7	293,0	297,1	-8,3	-12,4	-2,9	-4,4
11		287,2	277,2	304,1	10,0	-16,9	3,5	-5,9
12		294,4	291,9	296,0	2,5	-1,6	0,9	-0,5
1	Regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników i wykładników funkcji	230,4	227,9	255,6	2,5	-25,2	1,1	-10,9
2		254,0	258,6	254,2	-4,6	-0,2	-1,8	-0,1
3		254,0	246,7	265,2	7,3	-11,2	2,9	-4,4
4		277,2	273,2	242,5	4,0	34,7	1,5	12,5
5		252,3	258,2	249,1	-5,9	3,2	-2,4	1,3
6		267,9	272,7	259,5	-4,8	8,4	-1,8	3,1
7		252,2	253,6	259,6	-1,4	-7,4	-0,6	-2,9
8		277,2	281,2	263,5	-4,0	13,7	-1,4	4,9
9		269,9	270,8	274,2	-0,9	-4,3	-0,3	-1,6
10		284,7	292,4	296,7	-7,7	-12,0	-2,7	-4,2
11		287,2	276,7	303,6	10,5	-16,4	3,6	-5,7
12		294,4	290,6	295,5	3,8	-1,1	1,3	-0,4

TABELA 15

Porównanie wyliczonej mocy parownika chłodziarki DV-290 oraz odchyłek od wartości zmierzonych dla regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona przed modyfikacją i po modyfikacji wartości współczynników i wykładników

Nr serii pomiarowej	Równanie	Moc parownika N_p	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych	Równanie dla 5 zmiennych	Równanie dla 6 zmiennych
			Moc parownika N		Odchyłka bezwzględna ΔN		Odchyłka względna δN	
		kW	kW		kW		%	
1	Regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona	230,4	230,7	268,3	-0,3	-37,9	-0,1	-16,5
2		254,0	254,0	245,7	0,0	8,3	0,0	3,3
3		254,0	251,8	276,9	2,2	-22,9	0,9	-9,0
4		277,2	267,7	245,8	9,5	31,4	3,4	11,3
5		252,3	257,5	267,3	-5,2	-15,0	-2,1	-5,9
6		267,9	272,6	271,5	-4,7	-3,6	-1,8	-1,3
7		252,2	253,4	282,7	-1,2	-30,5	-0,5	-12,1
8		277,2	275,5	267,7	1,7	9,5	0,6	3,4
9		269,9	273,8	295,8	-3,9	-25,9	-1,5	-9,6
10		284,7	292,9	293,1	-8,2	-8,4	-2,9	-3,0
11		287,2	282,3	314,7	4,9	-27,5	1,7	-9,6
12		294,4	289,1	295,5	5,3	-1,1	1,8	-0,4
1	Regresja nieliniowa metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona ze zmodyfikowanymi wartościami współczynników i wykładników funkcji	230,4	230,8	261,3	-0,4	-30,9	-0,2	-13,4
2		254,0	254,1	240,0	-0,1	14,0	0,0	5,5
3		254,0	251,8	271,2	2,2	-17,2	0,9	-6,8
4		277,2	267,7	239,7	9,5	37,5	3,4	13,5
5		252,3	257,4	261,3	-5,1	-9,0	-2,0	-3,6
6		267,9	272,6	265,5	-4,7	2,4	-1,7	0,9
7		252,2	253,4	274,4	-1,2	-22,2	-0,5	-8,8
8		277,2	275,5	261,7	1,7	15,5	0,6	5,6
9		269,9	273,8	289,9	-3,9	-20,0	-1,4	-7,4
10		284,7	292,9	292,6	-8,2	-7,9	-2,9	-2,8
11		287,2	282,3	314,2	4,9	-27,0	1,7	-9,4
12		294,4	289,1	295,5	5,3	-1,1	1,8	-0,4

Z modeli statystycznych, które brały pod uwagę sześć zmiennych niezależnych, najmniejszą odchyłkę maksymalną mocy cieplnej parownika od wyników pomiarowych uzyskano za pomocą regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu (3). Jednak najbardziej dopasowany funkcyjnie okazał się model wyznaczony za pomocą regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa i quasi-Newtona (5), dla którego moc korelacji wynosiła 0,85.

3. Wnioski

Analiza uzyskanych rezultatów pokazanych w tabelach 7–12 pozwala stwierdzić, że najmniejsze odchyłki obliczonej mocy parownika chłodziarki DV-290 od jego mocy otrzymanej z pomiarów uzyskano za pomocą metody regresji liniowej dla wariantu pierwszego (1). Maksymalna odchyłka bezwzględna wynosi 8,2 kW, co stanowi 2,9% mocy pomierzonej.

Dla wariantu drugiego najmniejsze odchyłki od wartości rzeczywistych, za które uznano wyniki pomiarów, uzyskano za pomocą regresji nieliniowej metodą Hooke'a–Jeevesa przemieszczenia układu (3), w której (zarówno przed zmodyfikowaniem stałych, jak i po nim) maksymalne odchyłki wynoszą odpowiednio 34,8 kW i 34,7 kW, co stanowi około 12,5% mocy pomierzonej.

Wykorzystując otrzymane równania statystyczne do obliczeń mocy parownika, na podstawie tabel 13–15, można stwierdzić, że najbliższe rezultatom uzyskanym podczas pomiarów są wyniki obliczeń równaniem liniowym dla wariantu pierwszego. Stwierdzenie to dotyczy też równania po modyfikacji jego współczynników. Porównując między sobą wartości mocy korelacji, można wykazać, że pracę chłodziarki DV-290 współpracującej z wyparną chłodziarką wody RK-450 najlepiej opisują liniowe i zmodyfikowane liniowe równania statystyczne ($R^2 = 0,94$) dla wariantu pierwszego (z pięcioma zmiennymi niezależnymi).

Podsumowując powyższe wnioski, trzeba podkreślić, że ze względu na prostotę funkcji i wynikającą z niej możliwość łatwego obliczania mocy chłodziarki powietrza praktyczne zastosowanie mogą mieć liniowe równania statystyczne dla pięciu zmiennych niezależnych, szczególnie zmodyfikowane równanie liniowe (2). Na jego podstawie można już na etapie projektowania dobrać wymaganą moc cieplną chłodziarek oraz wybrać najlepszy pod względem skuteczności wariant lokalnego chłodzenia powietrza w konkretnych warunkach górniczo-geologicznych, a także prowadząc monitoring takiego systemu, szybko i skutecznie reagować na wszelkie nieprawidłowości w jego pracy.

LITERATURA

- [1] Nowak B., Filek K., Łuska P.: A Verification of Mathematical Model of Mine Air Compression Refrigerator Cooperating with Evaporative Water Cooler, Archives of Mining Sciences 2010, vol. 55, issue 2 (w druku)
- [2] Nowak B., Filek K., Kuczera Z., Łuczak R., Ptasiński B., Życzkowski P.: Wykorzystanie analizy statystycznej do oceny jakości pracy parownika chłodziarki DV-290 współpracującej z wyparną chłodziarką wody, Materiały Konferencyjne „Polskiego Kongresu Górniczego – Kongresu Górnictwa Podziemnego”, Gliwice 2010 (w druku)
- [3] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa chłodziarki powietrza DV-290, GFW WAT, Hamminkeln/Brunen 1997
- [4] Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem Statistica PL na przykładach z medycyny, Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe. Wydawnictwo StatSoft Polska, Kraków 2006
- [5] StatSoft: Elektroniczny Podręcznik Statystyki PL, WEB: <http://www.statsoft.pl/textbook/stathome.html>