

*termografia, ciekłe kryształy,
pomiar temperatury,
dokładność pomiaru*

Magdalena PIASECKA¹

OSZACOWANIE DOKŁADNOŚCI POMIARU TEMPERATURY POWIERZCHNI W TERMOGRAFII CIEKŁOKRYSTALICZNEJ

Celem artykułu jest oszacowanie dokładności pomiaru temperatury powierzchni w metodzie termografii ciekłokrystalicznej. Omówiono stanowisko pomiarowe do przeprowadzania kalibracji termoczułych ciekłych kryształów, celem ustalenia związku pomiędzy demonstrowaną barwą a odpowiadającą jej temperaturą powierzchni. Załączono szczegółowe wyniki otrzymane z przykładowego eksperymentu kalibracji. Przedstawiono szczegółowy tok obliczeń prowadzący do oszacowania dokładności pomiaru temperatury powierzchni w badaniach z termoczułymi ciekłymi kryształami. Dokładność pomiarów temperatury powierzchni, realizowanych na przedstawionym stanowisku doświadczalnym oszacowano na 0,86 K.

ASSESSMENT OF SURFACE TEMPERATURE MEASUREMENT ACCURACY IN LIQUID CRYSTAL THERMOGRAPHY

The article aims to assess surface temperature measurement accuracy in the liquid crystal thermography method. A measurement station for thermosensitive liquid crystal calibration has been discussed in order to establish a connection between the demonstrated hue and corresponding surface temperature. Detailed results obtained from a model calibration experiment have been included. A detailed course of calculations leading to the assessment of surface temperature measurement accuracy in tests with thermosensitive liquid crystals has been presented. The accuracy of surface temperature measurements taken at the experimental station under discussion has been rated at 0.86 K.

1. WSTĘP

Termografia ciekłokrystaliczna należy do bezstykowych metod pomiaru temperatury i jest stosowana w różnych dziedzinach techniki. W tej metodzie ciekłe kryształy naniesione na powierzchnię ciała stałego, umożliwiają uzyskanie rozkładu temperatury na powierzchni, w postaci barwnej mapy. W termografii ciekłokrystalicznej wykorzystuje się

¹Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Katedra Mechaniki,
25-314 Kielce, Al. 1000-lecia Państwa Polskiego 7.
Tel.: +48 41 3424320, Fax: +48 41 3448698, E-mail: tmpmj@tu.kielce.pl

unikalną własność ciekłych kryształów - selektywność odbicia światła od płaszczyznowo zorientowanych warstw tych substancji. Barwa światła selektywnie odbitego zależy od wielu czynników zewnętrznych takich, jak oddziaływania mechaniczne, kąt padania światła białego, itd. Przy odpowiednim składzie ciekłych kryształów barwa selektywnego odbicia silnie zależy od temperatury.

Zastosowanie jakiegokolwiek techniki pomiarowej w technice wymaga oszacowania dokładności pomiarów, w termografii – dokładności pomiaru temperatury powierzchni z warstwą ciekłych kryształów. Dokładność pomiaru zależna jest od bardzo wielu czynników. Podstawowe zależą od wykorzystywanego w badaniach układu akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych/obrazów kolorowych oraz od precyzji wykreślenia krzywej kalibracyjnej. Krzywa kalibracyjna otrzymywana jest jako efekt końcowy eksperymentu kalibracji barwy powierzchni z ciekłymi kryształami względem odpowiadającej jej temperatury. Kalibracja musi poprzedzać każdy cykl badań z nową partią ciekłych kryształów lub przy jakiegokolwiek zmianie parametrów układu rejestrującego obrazu. Jest to spowodowane zmiennością obrazu temperatury powierzchni wraz z kątem obserwacji i jego zależnością od składu widmowego padającego światła. Ponadto, ze względu na proces starzenia, któremu podlegają ciekłe kryształy, pojawia się konieczność okresowej weryfikacji pierwotnej charakterystyki kalibracyjnej.

2. ZASTOSOWANIE TERMOGRAFII CIEKŁOKRYSTALICZNEJ W BADANIACH WYMIANY CIEPŁA W MINIKANALE

2.1. Cechy ogólne metody termografii ciekłokrystalicznej

Termografię wykorzystuje się od lat 60-tych XX wieku do pomiaru rozkładu temperatury na powierzchniach i w płynach. Stanowi jedną z precyzyjniejszych i wygodniejszych metod wyznaczania dwuwymiarowego rozkładu temperatury dowolnej powierzchni. Jest wygodnym sposobem ilościowego pomiaru temperatury, ponieważ pozwala bezpośrednio wykrywać i obserwować obszar, który jest cieplejszy lub zimniejszy od temperatury otoczenia, bez pomiaru jej wartości. Cząstki termoczułych ciekłych kryształów odbijają widmo widzialne w określonym zakresie temperatur, zwanym *pasmem aktywnym*. Przed przystąpieniem do badań termograficznych z wykorzystaniem ciekłych kryształów, należy dobrać odpowiednią mieszaninę ciekłokrystaliczną. Dla najniższej temperatury, jaka wystąpi na badanej powierzchni, barwa selektywnego odbicia powinna być czerwona i powinna zmieniać się w sekwencji widma widzialnego (czerwień, żółty, zieleń, niebieski, fiolet) w barwę fioletową, występującą przy najwyższej temperaturze. Gdy temperatura powierzchni jest wyższa lub niższa od granic pasma aktywnego, widziana jest jedynie barwa czarna podłoża absorpcyjnego. Pasma aktywne wynosi zazwyczaj od kilku do kilkunastu stopni Kelwina. Stosując różne kombinacje termoczułych ciekłych kryształów można mierzyć temperatury szerokiego zakresu od 240 do 473 K [1,5], według [4] od 253 do 623 K, przy czym zastosowanie różnych rodzajów ciekłych kryształów pozwala na detekcję zmian temperatury rzędu 0,1 K.

2.2. System opisu barwy HSI

Niezwykle istotną informacją do analizy zachodzących procesów wymiany ciepła podczas przepływu cieczy przez minikanal, jest znajomość temperatury powierzchni na

powierzchni grzejnej. Cel ten realizowany jest przy wykorzystaniu termografii ciekłokrystalicznej, która wymaga odpowiedniego systemu akwizycji, przetwarzania i obróbki danych pomiarowych oraz obrazów kolorowych. Temperaturę w danym punkcie powierzchni grzejnej wyznacza się na podstawie zarejestrowanej barwy powierzchni folii, po przekształceniu zapisu barwy z systemu RGB na system HSI [6]. W badaniach przyjęto, że intensywność (I) oraz nasycenie (S) są stałe, a podstawą do opisu koloru powierzchni badanej stanowi wyłącznie barwa - H (*hue*). Aby ten warunek został spełniony zarówno w procesie kalibracji, jak i w badaniach eksperymentalnych niezmiennie muszą być odległości w pomiarowym układzie optycznym, kąt padania światła, oraz rodzaj światła. Barwa (*hue*) w biegunowym układzie współrzędnych przedstawia długość fali dominującego koloru i zdefiniowana jest jako kąt, w sposób następujący [2,5,6]:

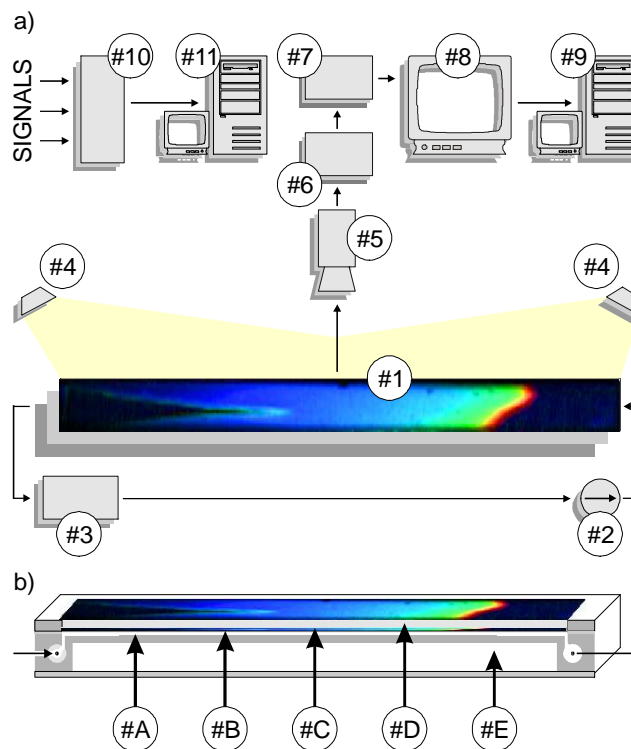
$$hue = \arctan\left(\frac{\sqrt{3}(G - B)}{2R - G - B}\right) \quad (1)$$

gdzie: R - zawartość składnika barwy czerwonej, G - zawartość składnika barwy zielonej, B - zawartość składnika barwy niebieskiej.

2.3. Stanowisko badawcze do kalibracji ciekłych kryształów

Najważniejszym elementem stanowiska badawczego jest moduł pomiarowy (#1-rys.1a, rys.1b) z minikanalem o głębokości $0,7 \div 2$ mm, przez który przepływa płyn chłodniczy. Jedną ze ścian kanału stanowi folia grzejna zasilana prądem stałym o kontrolowanym natężeniu. Na folii, na czarnej farbie podkładowej znajduje się warstwa ciekłych kryształów. Obserwację zmian barwy powierzchni folii umożliwia przesłonięty szklaną szybą otwór. Kanały pomocnicze w tylnej pokrywie modułu umożliwiają utrzymanie pożądanej temperatury na ściance minikanalu, uznawanej za quasiadiabaticzną. W skład stanowiska do kalibracji ciekłych kryształów ponadto wchodzi: pompa wirowa (#2), podgrzewacz elektryczny (#3) oraz system akwizycji i przetwarzania danych i obrazów kolorowych (#4 - #11).

W procesie kalibracji woda o zadanej temperaturze doprowadzana jest w obiegu zamkniętym do minikanalu oraz do kanałów pomocniczych w tylnej pokrywie modułu pomiarowego (#1). Ogrzewanie wody następuje w wyniku jej cyrkulacji poprzez zbiornik z grzejnikami elektrycznymi (#3), z płynną regulacją mocy przy wykorzystaniu autotransformatora. Rejestrowanie obrazu rozkładu temperatury na badanej powierzchni możliwe jest dzięki następującemu układowi: badana powierzchnia (#1), na wprost niej umieszczona kamera CCD (#5) z urządzeniem dekomponującym sygnał na RGB (#6) oraz ustawione pod jednakowym kątem do badanej powierzchni świetlówki emitujące „zimne” światło białe (#4). Pozostałe elementy układu rejestracji i przetwarzania obrazu kolorowego stanowią: magnetowid (#7) z monitorem (#8) oraz podłączony do niego komputer z monitorem i kartą akwizycji obrazu kolorowego (#9). Temperatura wody w pokazanych na rys.1b punktach modułu pomiarowego kontrolowana jest przy wykorzystaniu stacji akwizycji danych pomiarowych *Keithley 500A* (#10), współpracującej z oprogramowaniem *VIEWDAC*, zainstalowanym na kolejnym komputerze (#11).



Rys. 1. a) Schemat układu przepływowego do kalibracji ciekłych kryształów wraz z systemem akwizycji i przetwarzania danych pomiarowych: #1-moduł pomiarowy, #2-pompa wirowa, #3-podgrzewacz elektryczny, #4-źródła światła białego, #5-kamera CCD, #6-dekompozytor sygnału na RGB, #7-magnetowid, #8-monitor, #9-komputer z kartą akwizycji obrazu, #10-stacja akwizycji danych pomiarowych, #11-komputer; b) schemat modułu pomiarowego: A-minikanal, B-folia grzejna, C-ciekłe kryształy, D-szkło, E-pomocniczy kanał wodny

Dla ustalonej temperatury rejestrowany jest barwny obraz powierzchni folii grzejnej, pokrytej warstwą ciekłych kryształów i wyznaczana jest średnia wartość składników kolorów RGB dla zadanego obszaru. Następnie woda ulega podgrzaniu i dokonywany jest kolejny pomiar dla następnego ustalonej temperatury, co w konsekwencji prowadzi do wyznaczenia krzywej kalibracyjnej.

2.4. Wyniki przykładowego eksperymentu kalibracji

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki przykładowego eksperymentu kalibracji. W kolejnych kolumnach przedstawione są kolejno: numer pomiaru, zawartość składnika R , G i B w zarejestrowanym obrazie, zmierzona temperatura T_i , uśredniana ze wskazań temperatury płynu w kanale, kolejno w stopniach Celsjusza i Kelwina oraz wartość barwy (hue) wyznaczona ze wzoru (1) do przeliczenia z R , G i B barwy (hue) w skali 0-255.

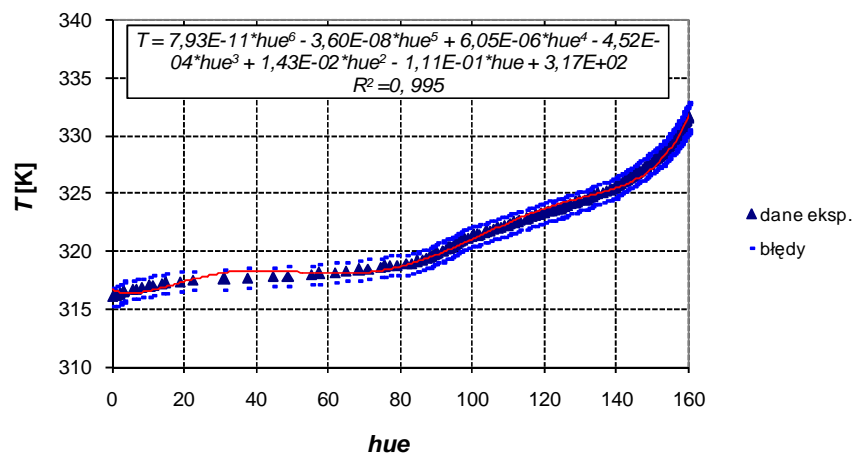
Tab. 1. Wyniki przykładowego eksperymentu kalibracji

Nr	R	G	B	T _i [°C]	T _i [K]	hue	Nr	R	G	B	T _i [°C]	T _i [K]	hue
1	91	41	41	42,90	316,05	0,00	49	45	190	84	47,50	320,65	95,67
2	100	44	42	43,00	316,15	1,23	50	44	190	85	47,60	320,75	96,19
3	105	46	42	43,10	316,25	2,30	51	43	189	86	47,70	320,85	96,80
4	108	47	43	43,20	316,35	2,23	52	43	190	88	47,80	320,95	97,31
5	114	49	43	43,30	316,45	3,10	53	42	189	89	47,90	321,05	97,92
6	120	51	44	43,40	316,55	3,39	54	41	188	91	48,00	321,15	98,84
7	137	59	45	43,50	316,65	5,75	55	40	186	92	48,10	321,25	99,57
8	144	63	46	43,60	316,75	6,62	56	40	185	94	48,20	321,35	100,31
9	152	69	47	43,70	316,85	8,12	57	39	183	96	48,20	321,35	101,39
10	158	77	48	43,80	316,95	10,44	58	39	181	97	48,30	321,45	101,98
11	159	80	48	43,90	317,05	11,52	59	38	179	99	48,40	321,55	103,10
12	161	87	49	44,00	317,15	13,80	60	38	177	100	48,50	321,65	103,72
13	161	90	50	44,10	317,25	14,76	61	37	176	102	48,60	321,75	104,73
14	157	98	50	44,20	317,35	18,84	62	37	174	104	48,70	321,85	105,74
15	154	105	51	44,30	317,45	22,39	63	36	172	106	48,80	321,95	106,94
16	144	118	52	44,40	317,55	31,23	64	36	170	107	48,90	322,05	107,65
17	137	126	53	44,50	317,65	37,60	65	35	168	109	49,00	322,15	108,89
18	129	134	54	44,60	317,75	44,77	66	35	166	110	49,10	322,25	109,64
19	124	138	54	44,70	317,85	48,84	67	34	165	111	49,20	322,35	110,35
20	117	146	55	44,80	317,95	55,37	68	34	163	113	49,30	322,45	111,49
21	115	149	56	44,90	318,05	57,50	69	34	161	115	49,40	322,55	112,65
22	109	154	56	45,00	318,15	61,84	70	33	160	115	49,50	322,65	113,01
23	105	157	57	45,10	318,25	64,69	71	33	159	119	49,60	322,75	114,68
24	99	162	58	45,20	318,35	68,68	72	33	158	120	49,70	322,85	115,28
25	95	165	59	45,30	318,45	71,18	73	32	156	121	49,80	322,95	116,25
26	88	167	59	45,40	318,55	74,35	74	32	155	123	49,90	323,05	117,21
27	86	170	60	45,50	318,65	75,74	75	32	153	125	50,00	323,15	118,46
28	83	171	60	45,60	318,75	76,98	76	32	153	126	50,10	323,25	118,81
29	79	173	61	45,63	318,78	78,90	77	32	152	128	50,20	323,35	119,78
30	73	177	63	45,70	318,85	81,78	78	31	150	130	50,30	323,45	121,10
31	70	179	64	45,80	318,95	83,12	79	31	149	132	50,30	323,45	122,08
32	67	179	65	45,90	319,05	84,38	80	31	148	133	50,40	323,55	122,71
33	66	180	65	46,00	319,15	84,69	81	31	147	134	50,50	323,65	123,34
34	63	181	66	46,10	319,25	85,90	82	31	146	136	50,50	323,65	124,31
35	60	183	68	46,20	319,35	87,36	83	31	146	137	50,60	323,75	124,64
36	58	185	69	46,30	319,45	88,18	84	30	145	138	50,70	323,85	125,30
37	57	184	69	46,40	319,55	88,48	85	30	144	138	50,70	323,85	125,60
38	55	185	70	46,50	319,65	89,29	86	30	144	140	50,80	323,95	126,25
39	54	185	71	46,60	319,75	89,85	87	30	142	141	50,90	324,05	127,18
40	53	185	72	46,70	319,85	90,42	88	30	141	144	51,00	324,15	128,44
41	51	187	74	46,80	319,95	91,44	89	30	141	146	51,10	324,25	129,05
42	50	188	75	46,90	320,05	91,93	90	30	140	147	51,20	324,35	129,67
43	49	188	77	47,00	320,15	92,78	91	29	138	150	51,20	324,35	131,16
44	48	189	77	47,10	320,25	92,95	92	29	137	151	51,30	324,45	131,76
45	47	189	79	47,10	320,25	93,79	93	29	137	152	51,40	324,55	132,05
46	47	189	80	47,20	320,35	94,09	94	29	136	153	51,50	324,65	132,65
47	46	190	81	47,30	320,45	94,54	95	29	135	154	51,60	324,75	133,24
48	45	190	82	47,40	320,55	95,07	96	29	134	155	51,70	324,85	133,84

Nr	R	G	B	T_i [°C]	T_i [K]	hue	Nr	R	G	B	T_i [°C]	T_i [K]	hue
97	29	133	157	51,80	324,95	134,70	146	26	89	216	56,70	329,85	156,55
98	29	132	161	51,90	325,05	136,05	147	26	88	215	56,80	329,95	156,70
99	28	130	163	52,00	325,15	137,10	148	25	87	217	56,90	330,05	156,94
100	29	129	165	52,10	325,25	137,98	149	25	87	217	57,00	330,15	156,94
101	28	128	168	52,20	325,35	138,91	150	26	86	217	57,10	330,25	157,33
102	29	127	169	52,30	325,45	139,54	151	25	84	217	57,20	330,35	157,64
103	28	126	169	52,40	325,55	139,76	152	25	84	218	57,30	330,45	157,71
104	28	125	170	52,50	325,65	140,29	153	25	83	217	57,40	330,55	157,87
105	28	125	171	52,60	325,75	140,51	154	25	82	219	57,50	330,65	158,24
106	28	124	173	52,70	325,85	141,24	155	25	82	221	57,60	330,75	158,37
107	28	123	175	52,80	325,95	141,96	156	25	82	221	57,70	330,85	158,37
108	28	123	177	52,90	326,05	142,36	157	25	81	221	57,80	330,95	158,59
109	28	122	178	53,00	326,15	142,86	158	25	80	221	57,90	331,05	158,82
110	28	121	179	53,10	326,25	143,35	159	25	79	222	58,00	331,15	159,11
111	28	120	180	53,20	326,35	143,84	160	25	78	223	58,10	331,25	159,39
112	28	119	182	53,30	326,45	144,51	161	25	78	224	58,20	331,35	159,45
113	27	118	183	53,40	326,55	144,86	162	25	77	224	58,30	331,45	159,66
114	28	117	184	53,50	326,65	145,45	163	25	76	224	58,40	331,55	159,88
115	27	116	184	53,60	326,75	145,62	164	25	76	224	58,50	331,65	159,88
116	27	116	186	53,70	326,85	145,95	165	25	75	225	58,60	331,75	160,16
117	27	115	187	53,80	326,95	146,41	166	25	74	225	58,70	331,85	160,37
118	27	113	188	53,90	327,05	147,15	167	25	74	225	58,80	331,95	160,37
119	27	112	190	54,00	327,15	147,74	168	25	73	226	58,90	332,05	160,64
120	27	111	192	54,10	327,25	148,32	169	25	72	227	59,00	332,15	160,90
121	27	111	192	54,20	327,35	148,32	170	25	71	226	59,10	332,25	161,06
122	27	109	192	54,30	327,45	148,89	171	25	71	228	59,20	332,35	161,16
123	27	109	193	54,40	327,55	149,03	172	25	70	228	59,30	332,45	161,37
124	26	107	194	54,50	327,65	149,59	173	25	69	228	59,40	332,55	161,58
125	26	106	196	54,60	327,75	150,13	174	25	69	228	59,50	332,65	161,58
126	26	106	196	54,70	327,85	150,13	175	25	68	229	59,60	332,75	161,83
127	26	105	198	54,80	327,95	150,66	176	25	68	228	59,70	332,85	161,79
128	26	104	200	54,90	328,05	151,17	177	25	67	229	59,80	332,95	162,04
129	26	102	200	55,00	328,15	151,71	178	25	67	229	59,90	333,05	162,04
130	26	102	203	55,10	328,25	152,05	179	25	66	228	60,00	333,15	162,20
131	26	100	203	55,20	328,35	152,58	180	25	66	229	60,10	333,25	162,24
132	26	100	204	55,30	328,45	152,69	181	25	65	229	60,20	333,35	162,45
133	26	99	205	55,40	328,55	153,05	182	25	64	229	60,30	333,45	162,65
134	26	97	205	55,50	328,65	153,57	183	25	64	229	60,30	333,45	162,65
135	26	97	206	55,60	328,75	153,67	184	25	63	229	60,40	333,55	162,86
136	26	97	208	55,70	328,85	153,87	185	25	63	229	60,50	333,65	162,86
137	26	95	208	55,80	328,95	154,38	186	25	62	229	60,60	333,75	163,06
138	26	95	209	55,90	329,05	154,47	187	25	62	230	60,60	333,75	163,09
139	26	95	210	56,00	329,15	154,57	188	25	61	230	60,70	333,85	163,30
140	26	94	210	56,10	329,25	154,82	189	25	60	228	60,80	333,95	163,43
141	26	93	211	56,20	329,35	155,16	190	25	60	229	60,90	334,05	163,46
142	26	92	212	56,30	329,45	155,49	191	25	60	229	61,00	334,15	163,46
143	26	91	214	56,40	329,55	155,90	192	25	60	230	61,10	334,25	163,50
144	26	90	214	56,50	329,65	156,15	193	25	59	229	61,20	334,35	163,66
145	26	90	215	56,60	329,75	156,23	194	25	58	230	61,30	334,45	163,89

Nr	R	G	B	T_i [°C]	T_i [K]	hue	Nr	R	G	B	T_i [°C]	T_i [K]	hue
195	25	58	230	61,40	334,55	163,89	219	25	46	224	63,80	336,95	166,10
196	25	57	229	61,50	334,65	164,06	220	25	45	223	63,90	337,05	166,27
197	25	56	229	61,60	334,75	164,26	221	25	44	224	64,00	337,15	166,48
198	25	56	228	61,70	334,85	164,23	222	25	44	223	64,10	337,25	166,47
199	25	55	229	61,80	334,95	164,46	223	24	43	221	64,20	337,35	166,45
200	25	55	229	61,90	335,05	164,46	224	25	43	222	64,30	337,45	166,64
201	25	55	229	62,00	335,15	164,46	225	24	43	222	64,40	337,55	166,47
202	25	54	229	62,10	335,25	164,65	226	25	42	220	64,50	337,65	166,80
203	25	53	229	62,20	335,35	164,85	227	24	42	221	64,60	337,75	166,64
204	25	53	228	62,30	335,45	164,82	228	25	41	219	64,80	337,95	166,98
205	25	52	228	62,40	335,55	165,02	229	24	40	217	65,00	338,15	166,97
206	25	52	228	62,50	335,65	165,02	230	24	39	216	65,20	338,35	167,15
207	25	51	228	62,60	335,75	165,21	231	24	37	212	65,60	338,75	167,49
208	25	50	227	62,70	335,85	165,38	232	24	36	210	66,00	339,15	167,66
209	24	50	228	62,80	335,95	165,24	233	24	35	207	66,50	339,65	167,82
210	25	49	227	62,90	336,05	165,58	234	24	34	203	67,00	340,15	167,98
211	25	49	227	63,00	336,15	165,58	235	24	33	198	67,50	340,65	168,14
212	24	49	227	63,10	336,25	165,41	236	24	31	192	68,00	341,15	168,51
213	25	48	225	63,20	336,35	165,73	237	23	30	183	68,50	341,65	168,43
214	25	48	226	63,30	336,45	165,75	238	23	29	174	69,00	342,15	168,58
215	25	47	225	63,40	336,55	165,92	239	23	28	162	69,50	342,65	168,71
216	24	46	224	63,50	336,65	165,92	240	23	27	153	70,00	343,15	168,90
217	25	46	225	63,60	336,75	166,12	241	23	27	138	70,50	343,65	168,76
218	25	46	224	63,70	336,85	166,10							

Na rys. 2 przedstawiono krzywą kalibracyjną w postaci wykresu zależności temperatury w funkcji barwy (*hue*), sporządzoną na podstawie danych zamieszczonych w tabeli 1.



Rys. 2. Wykres temperatury w funkcji barwy (*hue*) – krzywa kalibracyjna

3. OCENA DOKŁADNOŚCI POMIARÓW TEMPERATURY POWIERZCHNI WYKONANYCH METODĄ TERMOGRAFII CIEKŁOKRYSTALICZNEJ

3.1. Wybrana metoda obliczeń błędów pomiarowych

Ocenę błędów przeprowadzono zgodnie z zasadami analizy dokładności pomiarów w badaniach eksperymentalnych, przedstawionej w [3]. Jako miarę wielkości błędów przyjęto błąd średni kwadratowy. Wyznaczono go jako pierwiastek z sumy kwadratów iloczynów pochodnych cząstkowych funkcji, względem danego parametru zewnętrznego, występującego w pomiarze bezpośrednim, przez błąd średni pomiaru danego parametru.

3.2. Metodyka prowadzenia obliczeń błędów pomiaru temperatury

Przyjęto, podobnie jak w [2], że średni błąd temperatury dla pojedynczego punktu wyznaczony na podstawie barwy (*hue*) w wyniku eksperymentu kalibracji, wyniesie:

$$\sigma = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \sigma_i = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P \sqrt{\left(\frac{\partial T(\text{hue}_i)}{\partial \text{hue}_i} \cdot \Delta \text{hue} \right)^2 + (2 \cdot \text{SEE})^2 + (\Delta T_{\text{temp}})^2} \quad (2)$$

gdzie: *i*-punkt pomiarowy; *P*-liczba punktów pomiarowych, *T*-temperatura [K], Δhue -błąd wyznaczenia barwy (*hue*) dla zapisywanego i przetwarzanego obrazu; przyjęto, że jest równy podwójnemu odchyleniu standardowemu, wyznaczonemu na podstawie danych dla przykładowego obrazu powierzchni podczas doświadczenia kalibracji; *SEE*-oszacowanie błędu standardowego wpasowania krzywej kalibracyjnej, wyznaczonej przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów, według wzoru:

$$\text{SEE} = \sqrt{\frac{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P (T(\text{hue}_i) - T_i)^2}{P - m - n}} \quad (3)$$

przy czym: *m*-stopień wielomianu przybliżającego krzywą kalibracyjną, *m*=6; *n*-stopień pochodnej, *n*=1; ΔT_{temp} -błąd bezwzględny pomiaru temperatury płynu na wlocie i wylocie do minikanału.

Na ΔT_{temp} składają się błędy wynikające z przetwarzania sygnału przez karty akwizycji, wchodzące w skład stacji akwizycji danych pomiarowych *Keithley 500A* oraz błąd czujników termoelementów, co przedstawiono wzorem:

$$\Delta T_{\text{temp}} = \sqrt{(\Delta T_{\text{card}})^2 + (\Delta T_{\text{therm}})^2} \quad (4)$$

W błędzie bezwzględnym przetwarzania sygnału przez odpowiednie karty stacji akwizycji danych pomiarowych ΔT_{card} należy uwzględnić błąd karty z 16-bitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym *AMM 2* oraz karty termoparowej *AIM7* o 16 kanałach wejściowych dla termopar. Dla karty termoparowej *AIM 7* o zakresie pomiarowym 0 ÷ 50 mV: niedokładność karty: ±0,01% zakresu + 10 μV, czyli $\Delta T_{\text{card}_1a} = 15 \mu\text{V}$, błąd nieliniowości karty: ±0,005% zakresu, czyli $\Delta T_{\text{card}_1b} = 2,5 \mu\text{V}$. Dla

karty z 16-bitowym przetwornikiem analogowo-cyfrowym AMM 2: ponieważ 1 bit odpowiada $50\text{mV}/(2^{16} - 1) = 0,763 \mu\text{V}$, dla zakresu mierzonych temperatur $0\div 353 \text{ K}$, rozdzielczość przetwarzania i możliwa dokładność wyniesie $\Delta T_{card_2} = 0,763 \mu\text{V}$, czyli $0,018 \text{ K}$.

Zatem błąd bezwzględny, wynikający z przetwarzania sygnału przez karty stacji akwizycji danych pomiarowych, można obliczyć według wzoru:

$$\Delta T_{card} = \sqrt{(\Delta T_{card_1a})^2 + (\Delta T_{card_1b})^2 + (\Delta T_{card_2})^2} \quad (5)$$

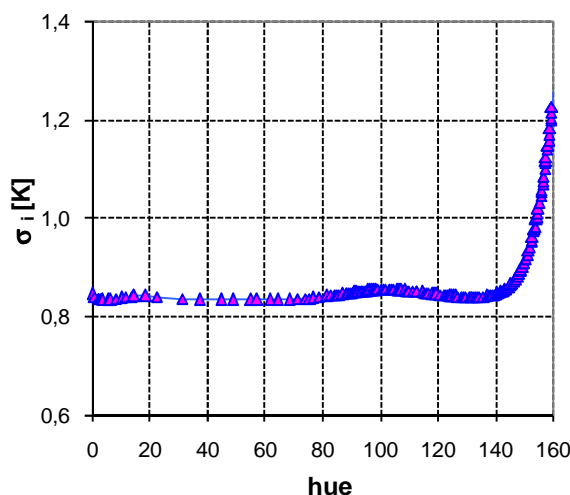
Błąd bezwzględny ΔT_{therm} wynika z błędu wzorcowania termoelementu ΔT_{cal} i błędu pomiaru termoelementem ΔT_{sens} , czyli kolejno:

- graniczna czułość kalibratora termoelementów ΔT_{cal} - każdy z termoelementów cechowano kalibratorem termoelementów ALTEK 422 firmy *Introl* (Polska); dokładność urządzenia $\pm 0,007\%$ dla zakresu 50 mV ; przyjęto $\Delta T_{cal} = 3,5 \mu\text{V}$;
- graniczna czułość termoelementów ΔT_{sens} - maksymalna rozdzielczość przetwornika karty termoparowej, współpracującego z termoelementami wynosi $10 \mu\text{V}$; błąd bezwzględny termoelementów przyjęto równy $\frac{1}{2}$ podanej rozdzielczości, stąd $\Delta T_{pom} = 5 \mu\text{V}$.

$$\Delta T_{therm} = \sqrt{(\Delta T_{cal})^2 + (\Delta T_{sens})^2} \quad (7)$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości liczbowych do (4) otrzymano wartość $16,40 \mu\text{V}$, co odpowiada błędowi pomiaru temperatury $\Delta T_{temp} = 0,39 \text{ K}$.

Wyniki obliczeń analizy błędów na podstawie załączonych w tablicy 1 danych są następujące: $P = 242$ punktów kalibracyjnych, $\Delta hue = 1,31$; $SEE = 0,14$ i $\Delta T_{temp} = 0,39 \text{ K}$. Po podstawieniu danych do wzoru (2) otrzymano wynik $\Delta T_{calib} = 0,86 \text{ K}$. Na rys. 3 przedstawiono wykres błędów temperatury w funkcji barwy (*hue*).



Rys. 3. Wykres błędów pomiarowych w funkcji barwy (*hue*), dla danych z tab.1

4. WNIOSKI

Technika termografii ciekłokrystalicznej umożliwia dokładny, powtarzalny pomiar rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej. Warunkiem koniecznym jej stosowania jest przeprowadzenie kalibracji oraz utrzymywanie stałych warunków oświetleniowych i odległości między elementami układu optycznego, zarówno w czasie kalibracji jak i badań doświadczalnych. Zastosowany system HSI do przetworzenia uzyskanego z posiadanego systemu akwizycji obrazu kolorowego w systemie RGB zapewnia dużą wygodę i uproszczenie przetwarzania rejestrowanych obrazów kolorowych, gdyż pozwala wielkości skalarnej, jaką jest temperatura, przypisać skalar, jakim jest barwa (*hue*), odczytywana ze wskazań ciekłych kryształów naniesionych na powierzchnię grzejną, zamiast trzech składników R, G i B.

Termografię ciekłokrystaliczną można wykorzystywać do detekcji dwuwymiarowego rozkładu temperatury na powierzchni z dokładnością, która jest uzależniona w bardzo dużym stopniu od zastosowanego systemu akwizycji i przetwarzania danych i obrazów kolorowych. Na podstawie przedstawionych w artykule danych eksperymentalnych, po przeprowadzeniu analizy błędów, otrzymano dokładność pomiaru rozkładu temperatury na powierzchni grzejnej z warstwą ciekłokrystaliczną równą 0,86 K.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Collings P.J.: *Liquid Crystals. Nature's delicate phase of matter*, Princeton University Press 1990
- [2] Hay J.L., Hollingsworth D.K.: *Calibration of micro-encapsulated liquid crystals using hue angle and a dimensionless temperature*, Exp. Thermal and Fluid Sc., vol.18, pp.251-257, 1998
- [3] Holman J. P.: *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York 1989.
- [4] Kasagi N., Moffat R.J., Hirata M.: *Liquid crystals. Handbook of flow visualization*, ed. W. Yang, Hemisphere Public Corp. 1989
- [5] Kenning D. B. R.: *Wall Temperature Patterns in Nucleate Boiling*, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 35, pp. 73-85, 1991
- [6] Piasecka M.: *Wykorzystanie termografii ciekłokrystalicznej do detekcji pola temperatury w badaniach wymiany ciepła podczas przepływu płynu chłodniczego w minikanale*, Logistyka nr 6/2009, CD